

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Ramunė LEBEDEVA

JŪROS APLINKOS POVEIKIS HIDROTECHNINIO BETONO ILGAAMŽIŠKUMUI

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
MEDŽIAGŲ INŽINERIJA (08T)



Vilnius LEIDYKLA
TECHNIKA 2018

Disertacija rengta 2012–2018 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Vadovas

doc. dr. Gintautas SKRIPKIŪNAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, medžiagų inžinerija – 08T).

Vilniaus Gedimino technikos universiteto Medžiagų inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:

Pirmininkas

dr. Viktor GRIBNIAK (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, medžiagų inžinerija – 08T).

Nariai:

dr. Diana BAJARE (Rygos technikos universitetas, medžiagų inžinerija – 08T),

prof. dr. Rimvydas KAMINSKAS (Kauno technologijos universitetas, chemijos inžinerija – 05T),

dr. Modestas KLIĞYS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, medžiagų inžinerija – 08T),

prof. dr. Juozas VALIVONIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, statybos inžinerija – 02T).

Disertacija bus ginama viešame Medžiagų inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje **2018 m. rugpjūčio 27 d. 10 val.** Vilniaus Gedimino technikos universiteto senato posėdžių salėje.

Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva.

Tel.: (8 5) 274 4956; faksas (8 5) 270 0112; el. paštas doktor@vgtu.lt

Pranešimai apie numatomą ginti disertaciją išsiųsti 2018 m. liepos 26 d.

Disertaciją galima peržiūrėti VGTU talpykloje <http://dspace.vgtu.lt/> ir Vilniaus Gedimino technikos universiteto bibliotekoje (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lietuva).

VGTU leidyklos TECHNIKA 2018-029-M mokslo literatūros knyga

<http://leidykla.vgtu.lt>

ISBN 978-609-476-116-4

© VGTU leidykla TECHNIKA, 2018

© Ramunė Lebedeva, 2018

adiurate@gmail.com

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Ramunė LEBEDEVA

SEA ENVIRONMENT INFLUENCE ON HYDROTECHNICAL CONCRETE DURABILITY

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
MATERIALS ENGINEERING (08T)



Vilnius LEIDYKLA
TECHNIKA 2018

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2012–2018.

Supervisor

Assoc. Prof. Dr Gintautas SKRIPKIŪNAS (Vilnius Gediminas Technical University, Materials Engineering – 08T).

The Dissertation Defence Council of Scientific Field of Materials Engineering of Vilnius Gediminas Technical University:

Chairman

Dr Viktor GRIBNIAK (Vilnius Gediminas Technical University, Materials Engineering – 08T).

Members:

Dr Diana BAJARE (Riga Technical University, Materials Engineering – 08T),

Prof. Dr Rimvydas KAMINSKAS (Kaunas University of Technology, Chemical Engineering – 05T),

Dr Modestas KLIGYS (Vilnius Gediminas Technical University, Materials Engineering – 08T),

Prof. Dr Juozas VALIVONIS (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – 02T).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Dissertation Defence Council of Materials Engineering in the Senate Hall of Vilnius Gediminas Technical University at **10 a. m. on 27 August 2018**.

Address: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania.

Tel.: +370 5 274 4956; fax +370 5 270 0112; e-mail: doktor@vgtu.lt

A notification on the intend defending of the dissertation was send on 26 of July 2018.

A copy of the doctoral dissertation is available for review at VGTU repository <http://dspace.vgtu.lt/> and at the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania).

Reziumė

Disertacijoje išanalizuotos Baltijos jūros aplinkoje esančių konstrukcijų hidrotechninio betono naudojimo sąlygos, Baltijos jūros vandens bei užšaldymo ir atšildymo ciklą ir chloridų difuzijos veikiamo betono irimo priežastys. Eksperimentiniais tyrimais nustatyta mineralinių priedų (aukštakrosnių šlako, klinties, akmens anglies deginimo pelenų, SiO_2 mikrodulkių) įtaka hidrotechninio betono savybėms bei tvarumui veikiant Baltijos jūros vandens cheminės sudėties tirpalais bei užšaldymo ir atšildymo ciklais. Ištirtos ir įvertintos Baltijos jūros aplinkos sąlygos Klaipėdos uosto akvatorijoje ir jų poveikis naudojamam hidrotechniniam betonui su skirtingais cementais, mineraliniais priedais ir stambiaisiais užpildais. Atlikus įvairių veiksnių (sorbcijos ir desorbcijos, chloridų difuzijos, užšaldymo ir atšildymo ciklą) poveikio hidrotechnikos statinių betonui analizę, sudaryta hidrotechninio betono ilgaamžiškumo bandymo metodika.

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados, naudotos literatūros ir disertacijos autorės publikacijų sąrašai.

Įvadiniamе skyriuje aptariama tiriamoji problema, darbo aktualumas, aprašomas tyrimų objektas, formuluojamas darbo tikslas ir uždaviniai, aprašoma tyrimų metodika ir jos metodologija, darbo mokslinis naujumas, darbo rezultatų praktinė reikšmė, ginamieji teiginiai. Įvado pabaigoje pristatomos disertacijos tema autorės paskelbtos publikacijos ir pranešimai konferencijose, seminaruose bei disertacijos struktūra.

Pirmasis skyrius skirtas literatūros analizei. Atliktoje literatūros analizėje aprašytos jūros uosto statinių betoninių ir gelžbetoninių konstrukcijų naudojimo sąlygos, hidrotechninio betono irimo procesai dėl cikliško užšaldymo ir atšildymo bei druskų poveikio, jūros vandens įtaka betono koroziniams procesams, mineralinių priedų įtaka hidrotechninio betono ilgaamžiškumui bei chloridų difuzijos procesai hidrotechniniame betone.

Antrajame skyriuje aprašytos tyrimams naudotos medžiagos ir jų savybės, betono mišinių sudėtys, taikyti tyrimų metodai ir naudota įranga, bandinių paruošimo, kietinimo ir tyrimų metodikos.

Trečiajame disertacijos skyriuje pateikti atliktų tyrimų rezultatai: Baltijos jūros aplinkoje eksploatuotų konstrukcijų pažaidų analizė ir ilgą laiką naudoto betono stiprumo charakteristikos ir druskų kiekis jame, aktyviųjų mineralinių priedų poveikis hidrotechninio betono savybėms, jo sorbcinėms charakteristikoms, chloridų difuzijai ir ilgaamžiškumui.

Iš gautų rezultatų suformuluotos bendrosios išvados ir parengta betono atsparumo Baltijos jūros aplinkos poveikiui bandymo metodika.

Abstract

Hydrotechnical concrete structures located in the Baltic sea environment maintenance conditions, causes of the Baltic sea water and freezing and thawing cycles influencing concrete damages were analyzed in dissertation. Experimental research determined mineral additives (blast furance slag, limestone, coal burning fly ashes, silica fume) influence to hydrotechnical concrete properties and changes after affecting with solution of the Baltic sea water chemical composition and freezing and thawing cycles. Environmental conditions of the Baltic sea port water area and their effect on hydrotechnical concrete with different cements, mineral additives and coarse aggregates were researched and evaluated. Hydrotechnical concrete durability testing methodology was created after performed analysis of different factors like sorption and desorption, chloride diffusion, influence of freezing and thawing cycles to concrete of hydrotechnical structures.

Dissertation consists of introduction, three chapters, general conclusions, reference list and list of dissertation author's academic publications.

Researched problem, work relevance are discussed, subject of research is described, work purpose and tasks are formulated, methods and its methodology, scientific work novelty, practical value and defensive statements are described in introduction chapter. Author's academic publications and reports on dissertation topic posted in conferences, seminars, also dissertation structure is presented at the end of introduction.

First chapter is dedicated to analysis of literature. Conditions of maintenance of seaport structures concrete and reinforced concrete structures, hydrotechnical concrete degradation mechanism from cyclical freezing and thawing and effect of salts, influence of sea water to corrosive processes of concrete, influence of mineral additives to durability of hydrotechnical concrete, processes of chloride diffusion were described in a performed analysis of literature as well.

Materials and their properties used in the research, composition of concrete mixtures, research methods and used equipment, sample preparation, curing and testing methods were described in second chapter. The new original testing method of concrete resistance to the Baltic sea Environment is presented.

Results of research are presented in third chapter of dissertation such as damages of structures maintained in the Baltic sea Environment, strength characteristics of long time maintained concrete, and quantity of salts in it, influence of active mineral additives on hydrotechnical concrete properties, its sorbtion characteristics, chloride diffusion and durability.

Žymėjimai

Simboliai

C_3S – trikalcio silikatas (alitas);

C_2S – dikalcio silikatas (belitas);

C_3A – trikalcio aliuminatas;

C_4AF – tetrakalcio aliumoferitas;

$C-S-H$ – kalcio hidrosilikatas, cemento hidratacijos produktas, (gelis);

CH – kalcio hidroksidas (portlanditas);

D – difuzijos koeficientas, m^2/s ;

pH – vandenilio potencialas, vandenilio jonų (H^+) koncentracijos tirpale matas, kuris rodo tirpalo rūgštingumą ar šarmingumą;

S_n – standartinis nuokrypis;

V – variacijos koeficientas, %;

V/C – vandens ir cemento (klinkerio) santykis;

V/R – vandens ir rišiklio (cementas ir mineralinis priedas) santykis;

X_d – chloridų difuzija (skverbtis).

Santrumpos

BJA – Baltijos jūros aplinka;

- HTS – hidrotechnikos statiniai;
HTSB – hidrotechnikos statinio betonas (hidrotechninis betonas);
XS – aplinkos poveikio klasė, kai armatūros korozija vyksta dėl jūros vandenyje esančio chloridų poveikio;
XC – aplinkos poveikio klasė, kai korozija vyksta dėl betono karbonizacijos efekto;
XF – aplinkos poveikio klasė, kai korozija vyksta dėl užšaldymo ir atšildymo poveikio esant drėgnos būklės;
XA – aplinkos poveikio klasė, kai korozija vyksta dėl cheminio poveikio;
XM – aplinkos poveikio klasė, kai korozija vyksta dėl abrazyvinio (dėvėjimo) poveikio.

Terminai ir apibrėžtys

Armatūros korozija – tai metalų irimas dėl fizikinės ir cheminės sąveikos su aplinka, kai metalas pereina į oksiduotą būklę ir praranda jam būdingas savybes.

Atsparumas šalčiui – prisotintos vandens ar druskos tirpalų medžiagos gebėjimas be aiškių irimo požymių išlaikyti daugkartinį užšaldymą ir atšildymą.

Baltijos jūros aplinka (BJA) – gamtiniai ir eksploataciniai veiksniai (oro temperatūra, santykinis drėgnumas, druskingas vanduo, vėjo greitis, bangų aukštis, užšaldymo ir atšildymo ciklų skaičius bei kiti) veikiantys betoną, naudojamą Baltijos jūros akvatorijoje ir pakrantėje.

Bandymo ciklas – vieną parą trunkantis bandomos medžiagos užšaldymas iki $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ ir atšildymas iki $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūros, įmirkant bandomos medžiagos paviršių kapiliariniu įgėrio būdu jūros vandens cheminės sudėties druskų tirpale.

Bandomasis paviršius – betoninio bandinio kraštinė, kuri įmerkama į bandymo terpę ilgaamžiškumo bandymo metu ir nuo kurios matuojami masės nuostoliai, atsirandantys bandymo metu.

Betono įmaiša – betono mišinio ir/arba sukietėjusio betono savybėms modifikuoti, maišant betono mišinį nedideliais kiekiais pridedama medžiaga, kurios kiekis turi neviršyti 5 % nuo cemento masės betono mišinyje (LST EN 934-2).

Betono desorbcija – absorbuotos ar adsorbuotos tam tikros medžiagos pa(si)šalinimas iš betono.

Betono sorbcija – cheminis reiškinys, kai betonas sugeria iš eksploatuojamos (bandomos) aplinkos tam tikras medžiagas (jūros vandenį, vandens garus).

Chloridų difuzija – procesas, kurio metu chloridų tirpalas (chloro druskų turintis jūros vanduo) skverbiasi iš betono paviršiaus į gilesnius betono sluoksnius.

Chloridų skverbtis – chloridų migracijos iš paviršinio į vidinius betono sluoksnius procesas.

Cemento klinkeris – hidraulinė rišamoji medžiaga, kurioje kalcio silikatų ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ir $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) yra ne mažiau kaip du trečdaliai masės. Kitą dalį sudaro aliuminio ir geležies turintys klinkerio mineralai ir kiti komponentai. $(\text{CaO})/(\text{SiO}_2)$ masių santykis turi

būti ne mažesnis kaip 2,0. Magnio oksido (MgO) kiekis turi būti ne didesnis kaip 5,0 % masės (LST EN 197-1).

Elektrocheminė korozija – korozija, vykstanti metalui liečiantis su elektra laidžiu skysčiu (elektrolitu); koroziją aktyvina vanduo, junginiai, kurių sudėtyje yra sieros ir kitų elektrocheminės reakcijos skatintojų.

Ekonomiškai pagrįsta statinio (konstrukcijos) naudojimo trukmė – laikotarpis, per kurį tikslinga naudoti statinį palaikant jo naudojimo savybes, atitinkančias esminius statinių reikalavimus pagal visus tarpusavyje susijusius aspektus: statinio projektavimo, statybos, naudojimo ir naudojamo statinio draudimo išlaidas, išlaidas, kurių reikia naudojimo sutrikimams išvengti; statinio griūties riziką ir pasekmes jo naudojimo laikotarpiu; planuojamą dalinį atnaujinimą; valymo, statinio priežiūros ir remonto išlaidas (Statybos įstatymas).

Granuliuotas aukštakrosnių šlakas – aktyvus mineralinis priedas, kurį sudarančių kalcio oksido (CaO), magnio oksido (MgO) ir silicio dioksido (SiO₂) kiekis yra ne mažesnis kaip du trečdaliai masės. Kita dalis turi susidėti iš aliuminio oksido (Al₂O₃) ir nedidelio kitų oksidų kiekio. (CaO + MgO)/(SiO₂) masių santykis turi būti didesnis kaip 1,0. Granuliuotas aukštakrosnių šlakas gaunamas kaip gamybos atlieka iš metalurgijos kombinatų (LST EN 197-1).

Hidrotechninis betonas – betonas, atitinkantis griežtesnius tankio, nepralaidumo vandeniui, atsparumo šalčiui ir ilgaamžiškumo reikalavimus (STR 2.05.18:2005) ir naudojamas hidrotechnikos konstrukcijoms statyti.

Ilgaamžiškumas – medžiagos gebėjimas tam tikrą laiką priešintis aplinkos poveikiams iki tam tikros medžiagos suirimo būsenos.

Įtraukto oro kiekis – tai procentais išreikštas oro kiekis, kuris maišant mišinį susidaro (įtraukiamas) sferinių burbuliukų pavidalu susidaro iš kietosios fazės paviršiuje esančio oro.

Išdžiovintas betonas – betonas, išdžiovintas džiovinimo spintoje iki pastovios masės, esant 105±5 °C temperatūrai.

Įmirkytas betonas – betonas, kuris po kietėjimo mirkomas 20±3 °C temperatūros vandenyje arba druskų tirpale iki pastovios masės.

Kapiliarinis įmirkymas – bandinių apatinio sluoksnio prisotinimas šaldomuoju tirpalu (bandymo terpe) panardinant bandinį 5±1 mm į šaldomąjį tirpalą (bandymo terpę).

Klintis – mineralinis priedas, sudarytas iš kalcio karbonato (CaCO₃), kurio kiekis, skaičiuojant pagal kalcio oksido (CaO) kiekį, yra ne mažesnis kaip 75 % masės, ir kurio smulkumas prilygsta cemento smulkumui (LST EN 197-1).

Lakieji pelenai – mineralinis priedas, smulkūs milteliai, turintys hidraulinių ir (arba) pucolaninių savybių. Pagrindinę jų dalį sudaro aktyvusis silicio dioksidas (SiO₂) ir aliuminio oksidas (Al₂O₃). Kitą dalį sudaro geležies oksidas (Fe₂O₃) ir kiti komponentai. Pelenai gaunami kaip kietojo kuro deginimo atlieka (LST EN 197-1).

Mineralinis priedas – smulkiai sumaltos miltelių pavidalo mineralinės medžiagos, įmaišomos ruošiant betono mišinius arba gaminant cementą ir turinčios įtakos rišiklio kietėjimo procesams bei betono mišinių ar sukietėjusio betono savybėms (mažinančios van-

dens atsiskyrimą ir sluoksniavimąsi, reguliuojančios rišimosi bei kietėjimo terminus, poringumo parametrus ir t. t.). Mineraliniai priedai gali būti tam tikros koncentracijos vandeninių suspensijų pavidalo.

Orą įtraukianti įmaiša – įmaiša, kuri maišomo betono mišinyje leidžia sudaryti kontroliuojamą kiekį smulkių, tolygiai pasiskirsčiusių oro burbuliukų, išliekančių sukietėjusiame betone (LST EN 934-2).

Orasausis betonas – betonas, po kietėjimo vandenyje išlaikytas kelias paras kambario sąlygomis, t. y. 20 ± 3 °C temperatūroje, esant 30–70 % santykinei drėgmei.

Sudėtinis portlandcementis – portlandcementis, kurio sudėtyje be cemento klinkerio yra ir mineralinių priedų nuo 6 % iki 35 % (LST EN 197-1).

SiO₂ mikrodulkės – aktyvus mineralinis priedas, smulkūs apvalių dalelių milteliai, turintys pagal masę ne mažiau kaip 85 % amorfinio silicio dioksido. Silicio dioksido mikrodulkės gaunamos kaip gamybos atlieka iš ferosilicio lydinių gamybos kombinatų (LST EN 197-1).

Turinys

IVADAS	1
Problemos formulavimas	1
Darbo aktualumas	2
Tyrimų objektas	2
Darbo tikslas	2
Darbo uždaviniai	2
Tyrimų metodika	3
Darbo mokslinis naujumas	3
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	3
Ginamieji teiginiai	4
Darbo rezultatų aprobavimas	4
Disertacijos struktūra	5
1. JŪROS APLINKOS POVEIKIO HIDROTECHNIKOS STATINIŲ BETONO ILGAAMŽIŠKUMUI TYRIMŲ ANALIZĖ	7
1.1. Jūrų uosto statinių betoninių ir gelžbetoninių konstrukcijų eksploatacijos sąlygos	7
1.1.1. Klaipėdos uosto teritorija, akvatorijos hidrotechnikos statiniai, klimato sąlygos	8
1.1.2. Jūrų uosto statinių hidrotechninio betono naudojimo sąlygų klasės	15
1.2. Hidrotechninio betono irimo procesai dėl cikliško užšaldymo ir atšildymo bei druskų poveikio	16

1.3. Jūros vandens įtaka betono korozijos procesams	21
1.4. Mineralinių priedų įtaka hidrotechninio betono ilgaamžiškumui	25
1.5. Chloridų difuzijos įtaka gelžbetoninių hidrotechnikos konstrukcijų irimo procesams	27
1.6. Jūros aplinkos veikiamų hidrotechnikos statinių (betono) ilgaamžiškumo vertinimo schema	30
1.7. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas	31
2. TYRIMAMS NAUDOTOS MEDŽIAGOS IR BETONO ATSPARUMO JŪROS APLINKAI BANDYMŲ METODIKOS	33
2.1. Medžiagos ir jų charakteristikos	33
2.1.1. Cementas	33
2.1.2. Mineraliniai priedai	35
2.1.3. Cheminės įmaišos	37
2.1.4. Užpildai	37
2.2. Hidrotechninio betono konstrukcijų, eksploatuojamų Baltijos jūros aplinkoje, techninės būklės vertinimo metodika	41
2.3. Baltijos jūros vandens cheminės sudėties ir druskų kiekio betone nustatymo metodika	42
2.4. Cemento tešlos, betono mišinio ruošimo, bandinių formavimo metodikos	43
2.5. Betono bandymų metodikos	48
2.5.1. Betono fizikinių savybių ir stiprumo bandymo metodikos	48
2.5.2. Ultragarso sklidimo greičio cemento akmenyje matavimas	50
2.5.3. Betono sorbcijos procesų bandymo metodika	50
2.5.4. Betono atsparumo Baltijos jūros aplinkos poveikiui bandymo metodika	51
2.5.5. Chloridų penetracijos betone bandymo metodika	54
2.6. Antrojo skyriaus išvados	58
3. MODIFIKUOTO HIDROTECHNINIO BETONO ATSPARUMO JŪROS APLINKOS POVEIKIUI TYRIMAI	59
3.1. Baltijos jūros aplinkoje naudojamo hidrotechninio betono tyrimai	60
3.1.1. Hidrotechninio betono statinių pažaidų tyrimai	60
3.1.2. Druskų kiekis Baltijos jūros vandenyje	65
3.1.3. Baltijos jūros aplinkoje naudojamo hidrotechninio betono fizikinės ir mechaninės savybės	67
3.1.4. Baltijos jūros aplinkoje naudoto betono struktūra	69
3.1.5. Druskų kiekis Baltijos jūros aplinkoje naudotame betone	71
3.2. Mineralinių priedų įtaka betono atsparumui Baltijos jūros aplinkos poveikiui	72
3.2.1. Mineraliniais priedais modifikuoto cemento akmens atsparumo Baltijos jūros aplinkos poveikiui tyrimai	72
3.2.2. Jūros vandens druskų tirpalo poveikis cemento akmens ilgaamžiškumui	75
3.3. Hidrotechninio betono, modifikuoto mineraliniais priedais, tyrimai	76

3.3.1. Hidrotechninio betono, modifikuoto mineraliniais priedais, mišinių technologinės savybės.....	76
3.3.2. Hidrotechninio betono, modifikuoto mineraliniais priedais, fizikinės ir mechaninės savybės.....	81
3.3.3. Hidrotechninio betono, modifikuoto mineraliniais priedais, sorbcinės savybės.....	83
3.3.4. Hidrotechninio betono, modifikuoto mineraliniais priedais, atsparumo Baltijos jūros aplinkos poveikiui tyrimai.....	93
3.3.5. Hidrotechninio betono su žvirgždo skaldos stambiuoju užpildu atsparumo Baltijos jūros aplinkos poveikiui tyrimai.....	103
3.3.6. Hidrotechninio betono, modifikuoto mineraliniais priedais, chloridų difuzijos tyrimai.....	112
3.4. Betono atsparumo Baltijos jūros aplinkos poveikiui bandymo metodika.....	115
3.5. Trečiojo skyriaus išvados	115
BENDROSIOS IŠVADOS	119
LITERATŪRA IR ŠALTINIAI.....	121
AUTORĖS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS.....	133
SUMMARY IN ENGLISH.....	135
PRIEDAI ¹	151
A priedas. Betono atsparumo Baltijos jūros aplinkos poveikiui bandymo metodika	152
B priedas. Disertacijos autorės sąžiningumo deklaracija	168
C priedas. Bendraautorių sutikimai teikti publikacijoje skelbtą medžiagą mokslo daktaro disertacijoje.....	169
D priedas. Autorės mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos.....	172

¹ Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje.

Content

INTRODUCTION	1
Problem formulation	1
Relevance of the thesis	2
Research object	2
Aim of the thesis	2
Objectives of the thesis	2
Research methodology	3
Scientific novelty of the thesis	3
Practical value of the research findings.....	4
Defended statements	4
Approval of the research findings	4
Structure of the thesis	4
1. ANALYSIS OF SEA ENVIRONMENT INFLUENCE ON DURABILITY OF CONCRETE FOR HYDROTECHNICAL STRUCTURES	7
1.1. Exploitation conditions of sea port buildings concrete and reinforced concrete structures	7
1.1.1. Klaipėda seaport area, aquatorium hydrotechnical structures, the climate conditions	8
1.1.2. Sea port buildings hydrotechnical concrete exploitation conditions classes.....	15

1.2. Degradation processes of hydrotechnical concrete due to cyclic freezing and thawing with salts effects	16
1.3. Sea water influence on concrete corrosion processes.....	21
1.4. Mineral additives influence on hydrotechnical concrete durability.....	25
1.5. Chloride diffusion influence on reinforced concrete hydrotechnical structures degradation processes	27
1.6. Durability evaluation scheme for hydrotechnical buildings (concrete) in marine environment exploitation.....	30
1.7. Conclusions of Chapter 1 and the formulation of the thesis objectives.....	31
2. THE MATERIALS USED FOR RESEARCH AND TEST METHODS FOR CONCRETE RESISTANCE TO THE SEA ENVIRONMENT	33
2.1. Materials and their characteristics.....	33
2.1.1. Cement	33
2.1.2. Mineral additives.....	35
2.1.3. Chemical admixtures.....	37
2.1.4. Aggregates.....	37
2.2. Technical inspection assessment methodology for hydrotechnical concrete structures in Baltic sea environment exploitation	41
2.3. Baltic sea water chemical composition and salt content in concrete measurements methodology	42
2.4. Cement paste, concrete mix preparation and samples preparation methodologies	43
2.5. Concrete testing methods	48
2.5.1. Test method for concrete physical properties and strength	48
2.5.2. Measurement by ultrasound pulse velocity in hardened cement paste	50
2.5.3. Test method for concrete sorption processes.....	50
2.5.4. Test method for concrete resistance to the Baltic sea environment.....	51
2.5.5. Test method for chloride penetration in concrete	54
2.6. The conclusions of Chapter 2.....	58
3. RESEARCH OF MODIFIED HYDROTECHNICAL CONCRETE RESISTANCE TO THE SEA ENVIRONMENT	59
3.1. Research of hydrotechnical concrete used after exploitation in the Baltic sea environment.....	60
3.1.1. Research of hydrotechnical concrete buildings damages	60
3.1.2. The salt content in the Baltic sea water	65
3.1.3. Physical and mechanical properties of hydrotechnical concrete used after exploitation in the Baltic sea environment	67
3.1.4. The structure of concrete used after exploitation in the Baltic sea environment	69
3.1.5. Salt content in concrete used after exploitation in the Baltic sea environment	71

3.2. Mineral additives influence on concrete resistance to the Baltic sea environment effects	72
3.2.1. Investigations of mineral additives modified hardened cement paste resistance to the Baltic sea environment.	72
3.2.2. Effect of seawater saline solution on the durability of hardened cement paste.....	75
3.3. Research of hydrotechnical concrete modified with mineral additives	76
3.3.1. Technological properties of hydrotechnical concrete mixtures modified with mineral additives	76
3.3.2. Physical and mechanical properties of hydrotechnical concrete modified with mineral additives	81
3.3.3. Sorption properties of hydrotechnical concrete modified with mineral additives.....	83
3.3.4. Resistance to the Baltic sea environment impact of hydrotechnical concrete modified with mineral additives research.....	93
3.3.5. Resistane to the Baltic sea environment impact of hydrotechnical concrete with crushed gravel coarse aggregate research.....	103
3.3.6. Chloride diffusion of hydrotechnical concrete modified with mineral additives	112
3.4. Test method of concrete resistance to the Baltic sea environment	115
3.5. The conclusions of Chapter 3	115
GENERAL CONCLUSIONS	119
REFERENCES	121
LIST OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS BY THE AUTHOR ON THE TOPIC OF THE DISSERTATION	133
SUMMARY IN ENGLISH.....	135
ANNEXES ²	151
Annex A. Concrete resistance to the Baltic sea environment test method.	152
Annex B. Author's declaration of academic integrity	168
Annex C. The co - author's agreements to present publications material in the doctoral dissertation.....	169
Annex D. Copies of the scientific publications by the author on the topic of the thesis.....	172

² The annexes are available in the CD attached to the dissertation.

Įvadas

Problemos formulavimas

Baltijos jūros aplinka veikia hidrotechnikos statinių (HTS) gelžbetonines konstrukcijas, eksploatuojamas Klaipėdos jūrų uoste (krantinės, pirsai, molai), pajūrio upių krantinėse bei Kuršių nerijoje pastatytose krantinėse. Dabartinė šių HTS būklė rodo, kad eksploatacijos metu Klaipėdos uosto akvatorijoje atsiranda daug pažaidų, ypač gelžbetoninių konstrukcijų paviršiuje, skiriamos didelės išlaidos HTS konstrukcijoms remontuoti arba rekonstruoti. Teisingas aplinkos sąlygų įvertinimas projektuojant bei statant HTS gelžbetonines konstrukcijas ir specialiojo betono naudojimas leistų pailginti šių konstrukcijų eksploatacijos trukmę ir sutaupyti lėšų. Minėtoms problemoms spręsti reikalingi tikslesni betono ilgaamžiškumo bandymo metodai ir ilgaamžiškumo padidinimo technologinės priemonės.

Disertacijoje pateiktų tyrimų rezultatai gali būti pritaikyti rengiant ir tobulinant norminius dokumentus, kuriant naujas hidrotechninio betono gamybos ir HTS gelžbetoninių konstrukcijų, eksploatuojamų BJA, betonavimo technologijas.

Darbo aktualumas

Lietuvoje, kartu ir kitose Baltijos jūros valstybėse eksploatuojama ir statoma gana daug HTS gelžbetoninių konstrukcijų, kurias veikia BJA (druskingas vanduo, temperatūros ir drėgmės pokyčiai, užšaldymo ir atšildymo ciklai ir kt.). Svarbu ištirti ir nustatyti hidrotechninio betono naudojimo sąlygas, veikiant BJA, ir jas taikyti naujai projektuojamiems HTS, sukurti hidrotechninio betono, naudojamo BJA, ilgaamžiškumo vertinimo metodiką. Tam reikalingi bandymo metodai, įvertinantys visus betono irimą sukeliančius poveikius (temperatūros ir drėgmės pokyčius, korozijos ir cikliško užšaldymo ir atšildymo procesus, chloridų difuzijos procesus), bei hidrotechninio betono irimo procesą charakterizuojantys parametrai, tokie kaip masės nuostoliai nuo betono paviršiaus, įmirkant kapiliarinio įgėrio būdu, sorbcijos ir desorbcijos parametrai, kuriuos galima panaudoti betonams, atspariems minėtiems veiksniams kurti.

Darbo rezultatai taikytini parenkant ir kontroliuojant HTS betono eksploatacines charakteristikas ir gaminant atsparius BJA poveikiui cementinius betonus.

Tyrimų objektas

Tyrimų objektas – aktyviaisiais mineraliniais priedais modifikuotas hidrotechninis betonas, eksploatacijos metu veikiamas Baltijos jūros aplinkos.

Darbo tikslas

Darbo tikslas – pagal Baltijos jūros aplinkoje vyraujančius ardančius veiksnius nustatyti hidrotechninio betono žaliavoms bei sudėčiai keliamus reikalavimus, užtikrinančius ekonomiškai pagrįstą betono naudojimo trukmę BJA.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti sprendžiami šie uždaviniai:

1. Ištirti charakteringas pažeidas, atsirandančias Klaipėdos uosto HTS betoninėse ir gelžbetoninėse konstrukcijose, eksploatuojamose BJA.
2. Ištirti jūros aplinkos sąlygų (temperatūros pokyčių, drėgmės pokyčių, užšaldymo ir atšildymo ciklų skaičiaus, vėjo greičio ir krypties, bangotumo, cheminio poveikio betonui ir kt.) įtaką betoninių ir gelžbetoninių konstrukcijų ilgaamžiškumui.
3. Eksperimentiniais tyrimais nustatyti kompleksinę Baltijos jūros vandens ir cikliško užšaldymo ir atšildymo poveikio įtaką hidrotechninio betono irimui.

4. Ištirti aktyviųjų mineralinių priedų (aukštakrosnių šlako, klinties, akmens anglies deginimo lakiųjų pelenų, SiO_2 mikrodulkių) bei skirtingų mineralinės sudėties užpildų įtaką BJA naudojamo hidrotechninio betono ilgaamžiškumui.
5. Parengti hidrotechninio betono atsparumo BJA poveikiui bandymo metodiką.

Tyrimų metodika

Hidrotechninio betono mišinių technologinių charakteristikų ir sukietėjusio betono eksploatacinių savybių vertinimas atliktas pagal metodikas reglamentuotas Europos standartuose.

Betono, naudojamo BJA, irimo procesams tirti buvo sukurta bandymo metodika: betono bandinys įmirkomas kapiliarinio įgėrio būdu Baltijos jūros vandens cheminę sudėtį atitinkančiame druskų tirpale, veikiamas užšaldymo ir atšildymo ciklais ir bandymo rezultatas vertinamas pagal masės nuostolius nuo bandomojo paviršiaus. Betono bandymas atliekamas talpinant bandinius specialiuose kontaineriuose su Baltijos jūros cheminės sudėties tirpalu, klimatinėje kameroje, esant automatinei temperatūrinio režimo kontrolei.

Betono laidumas chloridų tirpalams buvo tiriamas pagal metodiką „Nordtest NT492“, pagrįstą chloridų prasiskverbimo, skatinamo elektrinio potencialo, gylio matavimu betone.

Darbo mokslinis naujumas

Gautos mokslinės žinios apie betono irimo procesą sukeliančius veiksnius BJA eksploatacijos sąlygomis bei tokiomis sąlygomis naudojamo betono ilgaamžiškumo vertinimo charakteristikas.

Sukurta BJA veikiamo hidrotechninio betono ilgaamžiškumo bandymų metodika, kapiliarinio įgėrio būdu betono paviršių įmirkant Baltijos jūros vandens druskų tirpalu bei cikliškai užšaldant ir atšildant, vertinant betono irimo procesą masės nuostoliais nuo bandomojo paviršiaus.

Gautos naujos mokslinės žinios apie aktyviųjų mineralinių priedų įtaką hidrotechninio betono, naudojamo BJA, ilgaamžiškumui. Gauti rezultatai panaudoti hidrotechninio betono, naudojamo BJA, sudėtims projektuoti.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Sudaryta hidrotechninio betono ilgaamžiškumo bandymo metodika, kuria galima tiksliau įvertinti BJA eksploatuojamų HTS gelžbetoninių konstrukcijų betono naudojimo trukmę ir pateikti pasiūlymai, kaip padidinti hidrotechninio betono

atsparumą BJA poveikiui, cementinius betono mišinius su įprastiniu portlandcemenčiu modifikuojant aukštakrosnių šlako priedu ir SiO_2 mikrodulkėmis. Pateiktos rekomendacijos, kaip parinkti užpildus hidrotechniniam betonui, naudojamam BJA.

Ginamieji teiginiai

1. BJA eksploatuojamoms HTS gelžbetoninėms konstrukcijoms labiau būdingi betono paviršiaus suirimai ir armatūros korozijos reiškiniai, atsirandantys dėl betono sudrėkimo druskingu vandeniu ir temperatūros svyravimų, nei hidrotechninio betono tūrinis irimas, kurį charakterizuoja stiprumo sumažėjimas.
2. Hidrotechninio betono atsparumą Baltijos jūros aplinkos poveikiui galima vertinti masės nuostoliais nuo betono paviršiaus kapiliarinio įgėrio būdu betono paviršių įmirkant Baltijos jūros vandens cheminę sudėtį atitinkančiu druskų tirpalu ir cikliškai užšaldant ir atšildant.
3. BJA naudojamo betono ilgaamžiškumą galima padidinti modifikuojant betoną aukštakrosnių šlako ir SiO_2 mikrodulkių mineraliniais priedais, kurie sumažina betono sorbcinį vandens įgėrį.

Darbo rezultatų apibavimas

Disertacijos tema yra atspausdinti keturi moksliniai straipsniai: du – recenzuojamuose mokslo žurnaluose (Lebedeva 2013, 2015), du – recenzuojamuose užsienio mokslo žurnaluose (Lebedeva *et al.* 2013, 2016).

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti penkiose mokslinėse konferencijose ir trijuose seminaruose:

- Jaunųjų mokslininkų konferencijose „Mokslas – Lietuvos ateitis“, 2013, 2015, 2016 m. Vilniuje;
- Tarptautinėje konferencijoje „Advanced Materials and Technologies“, 2016 m. Palangoje;
- Tarptautinėje konferencijoje „Fly ash in construction“, 2017 m., Čekijoje;
- Pristatyti moksliniai pranešimai gamybinėje įmonėje UAB „Perdanga“, 2013, 2014 m. Klaipėdoje;
- Pristatytas mokslinis pranešimas VI Klaipėdos valstybinio jūrų uosto direkcijoje, 2016 m., Klaipėdoje.

Disertācijas struktūra

Disertāciju sudaro ģvadas, trys skyriai, bendrosios ģšvados, naudotos literatūros ir disertācijas autorės publikacijų sąrašai.

Darbo apimtis – 135 puslapiai, neįskaitant santraukos anglų kalba ir priedų, tekste panaudotos 4 numeruotos formulės, 103 paveikslai ir 23 lentelės. Rašant disertaciją panaudoti 156 literatūros šaltiniai.

Jūros aplinkos poveikio hidrotechnikos statinių betono ilgaamžiškumui tyrimų analizė

Skyriuje analizuojami literatūros šaltiniai apie jūros uosto statinių betoninių ir gelžbetoninių konstrukcijų eksploatacijos sąlygas, jų įtaką hidrotechnikos statinių gelžbetoninių konstrukcijų betono irimo procesams dėl cikliško užšaldymo ir atšildymo bei druskų poveikio, betono korozijos procesams. Nagrinėjama mineralinių priedų įtaka hidrotechninio betono ilgaamžiškumui bei hidrotechnikos statinių gelžbetoninių konstrukcijų (betono) ilgaamžiškumo vertinimo schema.

Šio skyriaus medžiaga paskelbta keturiuose moksliniuose straipsniuose (Lebedeva *et al.* 2016; Lebedeva 2015; Lebedeva 2013; Lebedeva *et al.* 2013) ir pristatyta penkiose mokslinėse konferencijose bei trijuose seminaruose.

1.1. Jūrų uosto statinių betoninių ir gelžbetoninių konstrukcijų eksploatacijos sąlygos

Baltijos jūros vanduo turi didelį poveikį Klaipėdos uosto hidrotechnikos statinių ilgaamžiškumui, todėl šis veiksnys turi būti ištirtas ir vertinamas projektuojant

gelžbetonines konstrukcijas, eksploatuojamas Baltijos jūros vandenyje. Baltijos jūros aplinkos poveikio hidrotechnikos statiniams analizė parodė, kad jūros aplinkoje naudojamam hidrotechniniam betonui didelę įtaką turi šie veiksniai: oro temperatūros ir vandens temperatūros svyravimai, vėjo kryptis ir greitis, užšaldymo ir atšildymo ciklų skaičius, chloridų skverbtis iki armatūros per apsauginį betono sluoksnį. Betono ilgaamžiškumo reikalavimai ir apribojimai, taip pat įvairūs žalingos betonui aplinkos poveikiai pateikti Europos standarte LST EN 206, tačiau jame nenumatomas visų veiksnių kompleksinis poveikis vienu metu, kurį patiria jūros aplinkoje naudojamas betonas.

Hidrotechninis betonas yra konglomeratinės struktūros medžiaga, kuriai būdingas kapiliarinis poringumas. Hidrotechninio betono kapiliarinį sudrėkimą sukelia Baltijos jūros vandens patekimas į kapiliarus, kuriais jis kyla į viršų gelžbetoninėje konstrukcijoje (Skripkiūnas 2007). Baltijos jūros vandens pakilimo kapiliarais aukštis priklauso nuo betone esančių kapiliarų skersmens ir sienelių paviršiaus drėkinamumo. Kapiliarinis sudrėkimas yra būdingas Klaipėdos uosto hidrotechnikos konstrukcijoms – krantinėms, pirsams, molams, nes jos yra nuolat veikiamos Baltijos jūros vandens skirtinguose paviršiaus lygiuose. Dėl difuzijos proceso jūros vanduo iš drėgnesnių betono sluoksnių juda sausesnių sluoksnių link, dėl savo specifinės cheminės sudėties sukeldamas cementiniame akmenyje tam tikrus korozinius procesus (Chisholm, Lee 2001). Užšaldymo ir atšildymo procesai sukelia kapiliarinėse betono porose esančio vandens tūrio pokyčius, kurie skatina atsirasti hidrotechnikos konstrukcijų destrukcijos procesus.

1.1.1. Klaipėdos uosto teritorija, akvatorijos hidrotechnikos statiniai, klimato sąlygos

Klaipėdos jūrų uostas – vienas didžiausių ir labiausiai į šiaurę nutolęs neužšalantis uostas Baltijos jūros rytų pakrantėje. Klaipėdos uosto infrastruktūra intensyviai modernizuojama keleivių aptarnavimui ir tarptautiniam jūrų turizmui plėtoti bei kroviniams vežti, todėl atliekama daug statybos darbų rekonstruojant ir atstatant krantinių būklę, statant naujus hidrotechnikos statinius. 1.1 paveiksle pateikta Klaipėdos uosto teritorija.

Klaipėdos valstybinis jūrų uostas įsikūręs Klaipėdos sąsiauryje, kuris yra Kuršių marių šiaurinėje dalyje. Į Kuršių marias suteka vanduo iš 75 % Lietuvos teritorijos, jis daro įtaką Baltijos jūros pakrantės vandenų būklei ir sumažina jūros vandens druskingumą (Klaipėdos uosto bendrojo plano ištrauka). Klaipėdos uosto hidrotechnikos statiniai (krantinės, pirsai, molai ir kt.) statomi iš hidrotechninio betono, kuris sudaro krantinės pagrindinės laikančiosios sistemos dalį ir kuriai labai svarbus ilgaamžiškumo rodiklis (STR 2.02.06:2004). Hidrotechniniam betonui keliami didesni reikalavimai, nei normaliajam betonui, kuriam reikalavimai pateikti Europos standarte LST EN 206.



1.1 pav. Klaipėdos uosto teritorija (Klaipėdos uosto bendrasis planas)

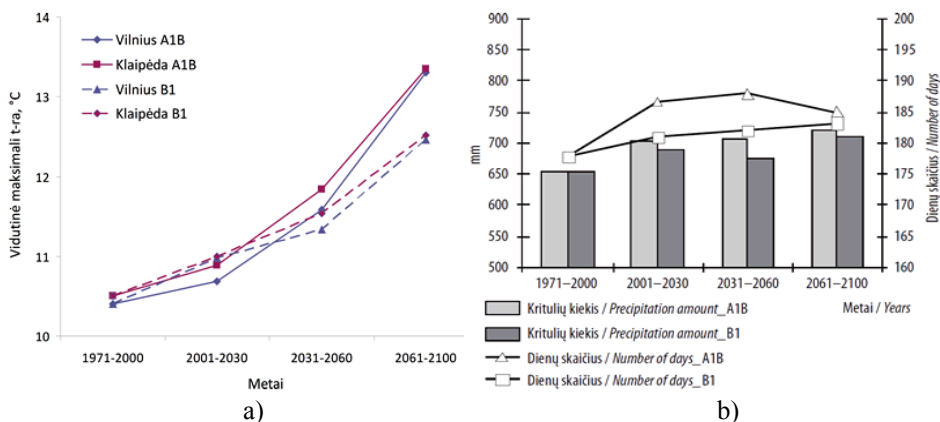
Fig 1.1. Klaipėda sea port area (Klaipėda port general plan)

Hidrotechnikos statiniai, sudaryti iš hidrotechninių betonų turi būti stiprūs, tankūs, nelaidūs vandeniui, atsparūs šalčiui ir agresyviajai aplinkai. Baltijos jūros vanduo turi didelį poveikį hidrotechniniam betonui, todėl reikia stebėti, kad Baltijos jūros vandens, patenkančio į hidrotechninį betoną, pH rodiklis būtų ne mažesnis už 4 ($\text{pH} > 4$), druskų kiekis ne didesnis už 5000 mg/l, sulfatų kiekis ne didesnis už 2000 mg/l (LST EN 206). Priešingu atveju jūros vandens poveikis sukelia hidrotechninio betono cheminę koroziją. Baltijos jūros vanduo palaipsniui gali išplauti iš hidrotechninio betono visas tirpias medžiagas, o dėl temperatūrų pokyčių hidrotechninis betonas gali supleišėti (Trocónis de Rincón, Sánchez *et al.* 2007). Visi įvardyti žalingi poveikiai ir ribiniai parametrai sukelia krantinių hidrotechninio betono irimą.

Mokslininkai, ištyrę klimato sąlygas Kuršių mariose ir Klaipėdos uosto teritorijoje: Baltijos jūros vandens temperatūrą, oro temperatūrą, Baltijos jūros vandens druskingumą, vandenilio jonų rodiklį (pH), vėjuotumą, vandens lygio pokyčius, nustatė pagrindinius rodiklius, kuriais galima vadovautis projektuojant hidrotechnikos konstrukcijas iš hidrotechninio betono. Klaipėdos uosto akvatorija pagal klimato sąlygas priskiriama Lietuvos vakarų klimato regionui (Bukantis 1994; Stankevičius 1997).

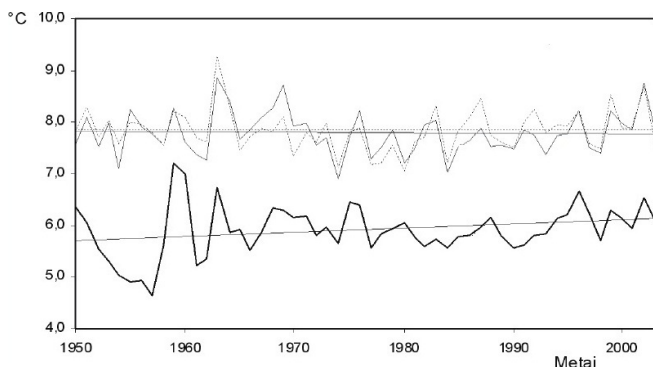
Nuolatinis vandens lygio kilimas, kritulių kiekio pokyčiai, stipresni vėjo gūsiai sukelia vis daugiau ekstremalių gamtinių reiškinių – audrų – Klaipėdos uosto akvatorijoje. Pateikti oro temperatūros, kritulių kiekio, vandens lygio kaitos Lietuvos teritorijoje tyrimai parodė, kad nuo 1971 m. trunkantys klimato svyravimai neigiamai veikia hidrotechninį betoną. A. Galvonaitė, A. Bukantis, E. Rimkus pateikė didžiausių kritulių kiekio žiemą ir vasarą pokyčių kreives, kuriomis autoriai pabrėžia, kad Klaipėdos regione kritulių kiekis intensyviai didėja. Remiantis mokslinių eksperimentų duomenimis, galima teigti, kad kritulių kiekis Klaipėdos regione palaipsniui kasmet didės daugiau nei 30 % (Galvonaitė *et al.* 2007). Didesnis kritulių kiekis sukelia didesnę naudojamo hidrotechninio betono įmirkį ir drėgnį, daugiau betono įmirkymo ir išdžiuvimo

ciklų bei didesnius hidrotechninio betono destruktinius procesus dėl užšaldymo ir atšildymo ciklų žiemą. Remdamiesi 1.2 paveiksle pateiktais duomenimis galime teigti, kad ateityje hidrotechninio betono naudojimo sąlygos Baltijos jūros aplinkoje nebus švelnesnės, atvirkščiai – jos agresyves.



1.2 pav. Oro temperatūros ir kritulių pokyčiai Klaipėdos apskrityje nuo 1971 iki 2100 m.: a) prognozuojama vidutinė metinė maksimali oro temperatūra; b) metinis kritulių kiekis (Galvonaitė *et al.* 2011)

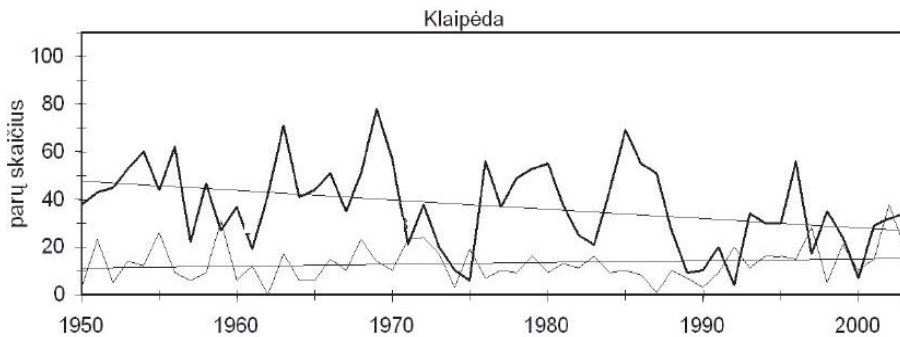
Fig. 1.2. The average annual maximum air temperature in Vilnius and Klaipėda (a) and the annual precipitation in Klaipėda County from 1971 to 2100 m. (b) (Galvonaitė *et al.* 2011)



1.3 pav. Vidutinės metų paros oro temperatūros amplitudės kaita: a) Kaune (—), Klaipėdoje (---) ir Vilniuje (...) 1950–2003 m. (Rimkus *et al.* 2007)

Fig. 1.3. Dynamics of the average amplitude of annual daily air temperature and its linear trend in Kaunas, Klaipėda and Vilnius MS in 1950–2003 (Rimkus *et al.* 2007)

(Bukantis, Valiuškevičienė 2007). Rezultatai pateikti 1.4 paveiksle. Klaipėdos miesto ir Vilniaus miesto paros oro temperatūros maksimumų vidurkių vertės $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ mažesnės nei Kauno ($10,2\text{ }^{\circ}\text{C}$). Klaipėdos miesto amplitudė – $4,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ (nuo $8,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 1956 m. iki $12,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 2000 m.) ir yra didžiausia iš visų trijų miestų, o Vilniaus miesto – $3,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ (nuo $8,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 1980 m. iki $11,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 1999 ir 2000 m.). Oro temperatūros paros ekstremumų skirtumus tarp tirtųjų miestų lemia absoliutus miesto žemės reljefo aukštis (jis kinta nuo 10 m Klaipėdoje iki 76 m Kaune ir 162 m – Vilniuje), atstumas iki jūros (jūros oro advekcija) ir klimato kontinentalumas. Pavyzdžiui, kuo toliau nuo jūros ir kuo didesnis absoliutusias aukštis, tuo žemesni paros oro temperatūros minimumai.



1.4 pav. Oro temperatūros ekstremumų skaičius per metus ir tiesinės tendencijos 1950–2003 m.: $T_{\text{maks}} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (apatinė kreivė Klaipėdos) (Bajerčiūtė *et al.* 2012)

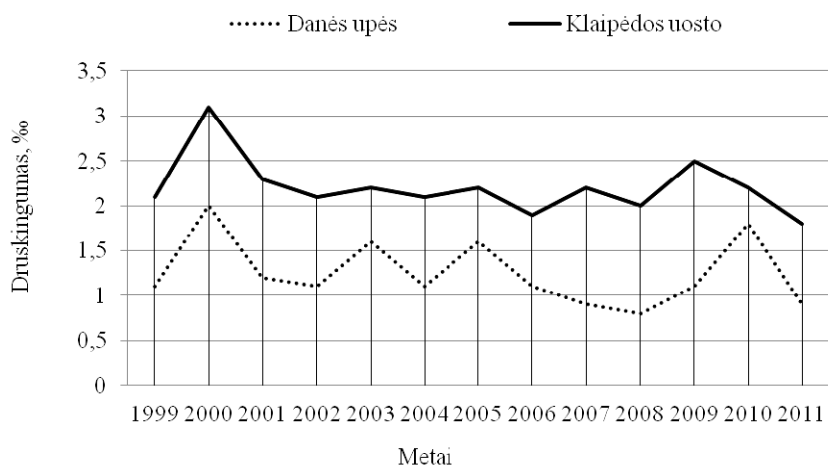
Fig. 1.4. The annual number of daily extreme values of air temperature and their linear trends in 1950–2003: $T_{\text{max}} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (lower curve) in Klaipėda (Bajerčiūtė *et al.* 2012)

Daugiausia dienų, kai temperatūra nukrinta žemiau $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ užfiksuota Vilniaus mieste (1.4 pav.). Jų skaičius per metus svyravo nuo 23 (1990) iki 103 (1963, 1980), amplitudė – 80 dienų. Vidutinis dienų kartojimasis tiriamuoju laikotarpiu – $63,7\text{ d./m.}$ Kaune dienų svyravimo amplitudė – 82 dienos (nuo 16 1990 m. iki 98 1963 m.) (1.4 pav.). Dažniausiai ledo dienų skaičius per metus svyravo tarp 45 ir 75. Vidutinis ledo dienų skaičius per metus Kaune analizuojamuoju laikotarpiu buvo 54,8. Klaipėdoje ledo dienų skaičius svyravo nuo 4 (1992) iki 78 (1969), amplitudė – 74 (1.4 pav.). Klaipėda išsiskiria mažiausia ledo dienų tikimybe – vidutiniškai $37,5\text{ d./m.}$ Taigi ledo dienų daugėja iš vakarų į rytus, didėjant klimato kontinentalumui (Bukantis, Valiuškevičienė 2005).

A. Bajerčiūtė, D. Pupienis, remdamiesi globalaus klimato modeliavimo rezultatais teigia, kad nuo XX a. vidurio prasidėjo akivaizdūs atmosferos ir vandenyno sąveikos pokyčiai, dėl kurių prognozuojama, kad vidutinė metinė oro

temperatūra visame Baltijos regione iki 2100 m. gali pakilti 3–5 °C ir turėti įtakos vandens temperatūros ir druskingumo kaitai. Druskingumas Kuršių mariose ir Danės upės sankirtoje priklauso nuo pastovaus vandenų nuotėkio ir Baltijos jūros vandens prietakos. Priklausomai nuo vėjo stiprumo ir trukmės, vandens lygio tarp Kuršių marių ir Baltijos jūros svyravimų, druskingumas mariose gali labai kisti (Bajerčiūtė, Pupienis 2012).

Jūrinių tyrimų centro duomenimis didelį poveikį Klaipėdos uosto vandens druskingumui turi įtekantis iš Baltijos jūros druskingas vanduo. Iš 1.5 paveikslo matyti, kad Klaipėdos uosto teritorijoje vandens druskingumas siekia iki 3,2 promilės (3200 mg/l), o Danės upėje – 1,8 promilės (1800 mg/l) (Jūrinių tyrimų centro ataskaitos, 2011).



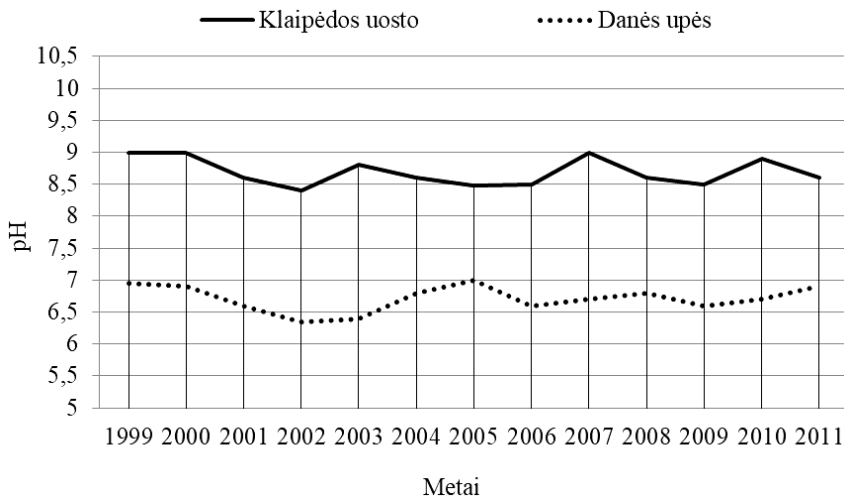
1.5 pav. Daugiamečiai sezoniniai vandens druskingumo Kuršių marių sąsiauryje ir sankirtoje su Danės upė 1999–2011 metų svyravimai (Jūrinių tyrimų ataskaitos 2011)

Fig. 1.5. Multi-seasonal salinity lagoon Strait junction with the river Dane 1999–2011 year fluctuations (Marine Surveys 2011)

Iš Jūrinių tyrimų ataskaitos (1.6 pav.) matyti, kad Klaipėdos uosto ir Danės upės vandens vandenilio jonų pH rodiklis yra silpnai šarminis arba neutralus, jis kinta Klaipėdos uosto akvatorijoje nuo 8,3 iki 9,05, o Danės upėje – nuo 6,0 iki 6,95. Silpnai šarminga vandens terpė nesukelia ardymo procesų hidrotechninio betono cementiniame akmenyje, tačiau gali sukelti hidrotechniniame betone esančios armatūros koroziją.

Klaipėdos uosto teritorija priklauso 1 Vakarų Lietuvos rajonui, 1a – pajūrio parajoniui. Kuršių mariose ir Danės upės sankirtoje vyrauja vakarų vėjai, todėl Klaipėdos uosto teritorijoje hidrotechninį betoną nuolat veikia jūrinis drėgnas oras. Vidutinis vėjo greitis Klaipėdoje siekia 6,0 m/s, o maksimalus – iki 37 m/s

(133 km/h). Uraganai, kurių greitis didesnis kaip 26 m/s (93 km/h) Klaipėdoje gali kartotis kas penkerius metus. Vakarų Lietuvos rajone 1999–2011 m. pasižymėjo vėjuotumu. Vėjo kryptių pasikartojimo kaitos tendencijos Lietuvos teritorijoje labai skiriasi. Pajūryje daugiausia išaugo PV ir ŠR krypties vėjų, o likusioje teritorijos dalyje PV vėjų mažėjo. Didžiausi pokyčiai užfiksuoti žiemą. Labiausiai Lietuvos teritorijoje susilpnėjo V ir PV kryptių vėjai. Žiemą pasikeitimai buvo pastebėti didesni nei vasarą (Strolytė, Rimkus 2012).



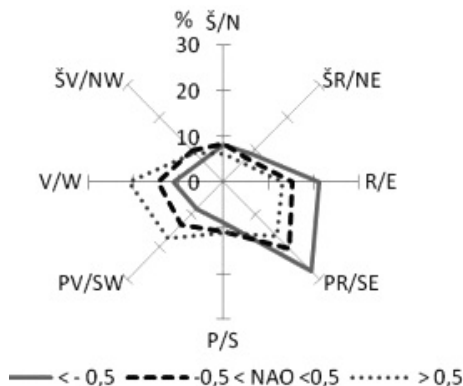
1.6 pav. Daugiamečiai sezoniniai vandens vandenilio jonų koncentracijos (pH) Kuršių marių sąsiauryje ir sankirtoje su Danės upe 1999–2011 metų svyravimai (Jūrinių tyrimų ataskaitos 2011)

Fig. 1.6. Multi seasonal water hydrogen ion concentration (pH) in the lagoon of the Strait and at the intersection of river Dane 1999–2011 year fluctuations (Marine Surveys, 2011)

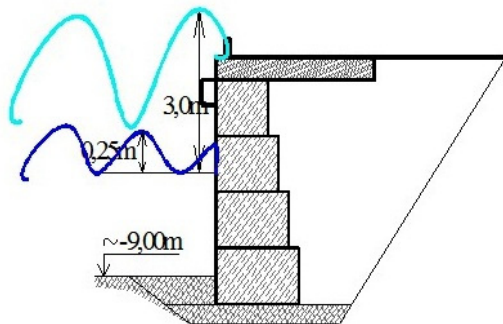
1.7 paveiksle pateiktais duomenimis iš mokslininkų atliktų tyrimų Klaipėdoje vasarą vyrauja vakarinių krypties vėjai, o žiemą – pietryčių. Paveiksle pateikti vėjo krypties ir greičio pasikartojimai, o cirkuliacija išskaidyta į tris intervalus: daugiau už 0,5 tarp 0,5 ir daugiau nei 0,5 (Strolytė, Rimkus 2012). Dėl didelio vėjuotumo Klaipėdos uosto akvatorijoje, pastebimas didesnis vandens bangavimas, kuris veikia Klaipėdos uosto akvatorijos hidrotechnikos statinius. Bangavimo metu hidrotechninį betoną veikia vandens purslai, o esant aukštesnėms bangoms, jūros vanduo sudrėkina hidrotechninio betono paviršių ir dėl difuzijos procesų sukelia paviršiaus irimo ir armatūros korozijos procesus.

Klaipėdos uosto akvatorijoje skirtingai nei Danės upėje nustatytas didesnis bangavimas. Vidutinis bangų aukštis per 1999–2011 m. laikotarpį siekė nuo

0,25 m iki 0,5 m, o kilus uraganui ir iki 3,0 m (1.8 pav.) (Jūrinių tyrimų ataskaitos 2011). Jūros vandens bangų slėgis bei ledas sukelia ir erozinius procesus hidrotechninio betono paviršiuje, kurie gali didinti betono paviršiaus pažaidas.



1.7 pav. Baltijos jūros aplinkos vėjų rožė (Strolytė *et al.* 2012)
Fig. 1.7. The wind rose in Baltic sea environment (Strolytė *et al.* 2012)



1.8 pav. Baltijos jūros aplinkoje eksploatuojamo gelžbetoninės hidrotechnikos statinio skersinio pjūvio ir banguotumo schema

Fig. 1.8. Baltic sea environment exploited hydrotechnical concrete structures cross section and waviness scheme

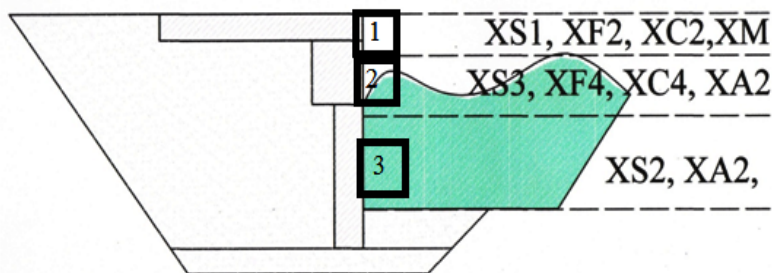
Bangų aukštis priklauso nuo vėjo stiprumo ir krypties. Klaipėdos uosto akvatorijoje bangavimui turi įtakos ir laivų, gabenančių krovinius srautai, jų judėjimo greitis. Danės upėje tokio srauto neturėjimas lemia mažesnę bangavimą, nei Klaipėdos uosto akvatorijoje (Jūrinių tyrimų ataskaitos 2011).

1.1.2. Jūrų uosto statinių hidrotechninio betono naudojimo sąlygų klasės

Klaipėdos jūrų uoste didžiąją dalį hidrotechnikos statinių sudaro statiniai iš hidrotechninio betono, kurį veikia skirtingi aplinkos poveikiai, kurie pagal Europos standartą apibūdinami aplinkos poveikių klasėmis. Aplinkos poveikio klasės skirstomos atsižvelgiant į hidrotechninio betono naudojimo sąlygas. Hidrotechninį betoną toje pačioje konstrukcijoje vienu metu gali veikti kelios aplinkos poveikių klasės. Todėl BJA poveikį hidrotechniniam betonui galima apibrėžti kaip aplinkos poveikių derinį, sudarytą iš kelių standartinių aplinkos poveikio klasių. Daug dėmesio reikėtų atkreipti į griežtesnius reikalavimus hidrotechniniam betonui atsparumo šalčiui požiūriu, t. y. užšaldymo ir atšildymo ciklų poveikiui veikiant druskoms, esančioms Baltijos jūros vandenyje. Šis rodiklis šiuo metu nustatomas pagal metodiką, pateiktą LST1428.17:2005 standarte, kuriame betono atsparumas šalčiui vertinamas tam tikromis atsparumo šalčiui markėmis: F25; F35; F50; F75; F100; F150; F200; F300; F400; F500; F600; F800; F1000 pagal užšaldymo ir atšildymo ciklų skaičių, kurį atlaiko betonas, labai nesumažindamas savo stiprumo. Minėtas atsparumas šalčiui bandymas pagal metodiką yra imlus laikui ir ištekliais, tad nėra tinkamas betono, naudojamo Baltijos jūros aplinkoje, ilgaamžiškumui įvertinti.

Atsižvelgiant į betoną veikiančius ardymo veiksnius eksploatacijos metu, galima išskirti 1.9 paveiksle pateiktas tris skirtingas hidrotechninio betono naudojimo zonas:

- pirmoji zona, esanti virš vandens lygio, kurioje betonas nėra įmirkęs dėl Baltijos jūros vandens kapiliarinio įgėrio, priskiriama XS1, XF2, XC2 aplinkos poveikio klasėms; šioje zonoje dėl užšaldymo ir atšildymo ciklų po pasitaikančio sudrėkimo ir Baltijos jūros vandens bei lietaus ar sniego kritulių poveikio vyksta hidrotechninio betono karbonizacija, armatūros korozija ir paviršiaus irimas;
- antroji zona, esanti vandens lygio kitimo zonoje, kurioje betonas yra nuolatos įmirkęs ir cikliška veikiamas galimos neigiamos temperatūros (paviršius yra ore), priskiriama XS3, XF4, XC4, XA2 aplinkos poveikio klasėms; šioje zonoje hidrotechninis betonas turi būti atsparus užšaldymo ir atšildymo ciklams, kartu ir druskų poveikiui, mažai laidus chloridams dėl armatūros korozijos, atsparus karbonizacijos procesams ir cheminiam poveikiui, t. y. Baltijos jūros vandenyje esantiems chloridams, sulfatams ir kitiems junginiams;
- trečioji zona, nuolat esanti po vandeniu, kurioje betonas yra chemiškai veikiamas Baltijos jūros vandens, betone pasireiškia armatūros korozija dėl intensyvių chloridų difuzijos procesų, priskiriama XS2, XA2 aplinkos poveikio klasėms; šioje zonoje hidrotechninis betonas turi būti atsparus sulfatinei korozijai ir mažo laidumo chloridams.



1.9 pav. Hidrotechninio betono aplinkos poveikio klasių zonos
Fig. 1.9. Environmental exposure classes zones in hydrotechnical concrete

Iš pateikto hidrotechnikos statinio ir jį sudarančio hidrotechninio betono, naudojamo Baltijos jūros aplinkoje, aplinkos poveikių galima daryti išvadą, kad hidrotechnikos statinių betonui reikia taikyti tokius sudėties apribojimus pagal Lietuvoje galiojančių LST EN 206 ir LST 1974 standartų reikalavimus: V/C santykis turi būti nuo 0,45 iki 0,50, mažiausias cemento kiekis – 300 kg, žemiausia hidrotechninio betono stiprumo klasė – C30/37, rekomenduojamas mažiausias oro kiekis betono mišinyje – 4 %. Tokio betono gamybai turi būti naudojami šalčiui atsparūs užpildai.

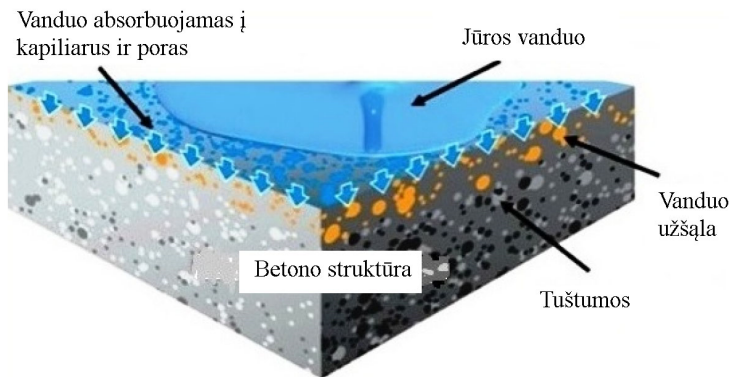
Parenkant hidrotechninio betono sudėtį turi būti įvertinami hidrotechniniam betonui keliami reikalavimai: stiprumas, atsparumas šalčiui, atsparumas karbonizacijai, atsparumas chloridų ir sulfatų poveikiui, laidumas chloridams. Todėl, projektuojant hidrotechnikos konstrukcijas, reikia tinkamai suformuluoti hidrotechninio betono techninę specifikaciją, įvertinant visus anksčiau minėtus aplinkos poveikių veiksniai, tinkamai vykdyti hidrotechninio betono gamybos ir pagaminto produkto kokybės kontrolę. Minėtoms priemonėms vykdyti būtina parengti hidrotechninio betono gamybos rekomendacijas ir minėtomis sąlygomis naudojamo hidrotechninio betono ilgaamžiškumo bandymo metodiką.

1.2. Hidrotechninio betono irimo procesai dėl cikliško užšaldymo ir atšildymo bei druskų poveikio

Betono atsparumas šalčiui apibūdinamas kaip medžiagos savybė atlaikyti daugkartinį atšaldymą ir atšildymą esant vandens prisotintai būklei (Skrupkiūnas 2007). Didžiausius irimo procesus hidrotechniniame betone sukelia užšaldymo ir atšildymo ciklai, atsirandantys dėl Baltijos jūros aplinkos gamtinių sąlygų. Eksploatuojama hidrotechnikos konstrukcija yra nuolat veikiamą drėgmės ir temperatūros pokyčių, t. y. užšaldymo ir atšildymo ciklų. Hidrotechninį betoną veikiant

vienu metu Baltijos jūros vandeniui bei užšaldymo ir atšildymo ciklams, vanduo betone virsta ledu, jo tūris padidėja iki 9 %. Įgertas vanduo hidrotechninio betono kapiliaruose ir porose, vykstant užšaldymo ir atšildymo ciklams, periodiškai sukelia didelį hidraulinį slėgį į kapiliarų ir porų sienes, taip betone sukeldamas ardančius tempimo įtempius. Toks nuolatinis užšaldymo ir atšildymo ciklų poveikis hidrotechniniame betone sukelia betono tūrio pokyčius, atsiranda plyšius ir mažėja stiprumas.

A. Moskvinas ir kiti mokslininkai nustatė, veikiant eksploatuojamą betoną užšalančiam vandeniui ir ledui slegiant porų ir kapiliarų sienes, priklausomai nuo cemento savybių ir V/C santykio cementinio akmens tūris didėja temperatūros intervaluose nuo -5°C iki -20°C . 1.10 paveiksle pateikta hidrotechninio betono, vienu metu veikiamo aplinkos poveikių, skatinančių betono irimą dėl cikliško užšaldymo ir atšildymo, schema.



1.10 pav. Hidrotechninio betono, naudojamo Baltijos jūros aplinkoje (BJA), vandens sorbcijos ir irimo procesų schema (Vairamuni 2015)

Fig. 1.10. Process of hydrotechnical concrete, exploited in Baltic sea environment (BSE), water absorption and degradation scheme (Vairamuni 2015)

Betonas, naudojamas jūros aplinkoje, yra veikiamas kelių aplinkos poveikių vienu metu: drėgmės (jūros vandens), vėjo, temperatūros pokyčių. Per paviršiaus kapiliarus betonas į gilesnius sluoksnius įgeria drėgmę iš atmosferos ir vandenį, kuriame jis naudojamas. Vykstant sorbcijos procesams, dėl cikliško užšaldymo ir atšildymo proceso laikui bėgant betone atsiranda defektų, dažniausiai plyšių, kurie palaipsniui sukelia tokio betono irimą (Vairamuni 2015).

Eksploatuojant hidrotechnikos statinius svarbi chloridų difuzija – penetracija, kuri turi didelę įtaką hidrotechninio betono ilgaamžiškumui. Chloridai laikomi viena pagrindinių gelžbetoninių konstrukcijų betono irimo ir jose esančios armatūros korozijos priežasčių. Vykstant užšaldymo ir atšildymo

ciklams, jūros vandenyje įmirkyto hidrotechninio betono irimas vyksta daug intensyviau negu gėlame vandenyje įmirkyto betono. Vienais atvejais betono irimas pasireiškia nuo paviršiaus atskilinėjant ploniems skiedininės dalies sluoksniams arba atšokant storiems sluoksniams kartu su stambiuoju užpildu, kitu atveju – supleišėjant betonui visame tūryje.

Nagrinėjant betono struktūros irimo dėl cikliško užšaldymo ir atšildymo procesų mechanizmą esant įsotintam vandeniui, autoriai T. C. Powers ir J. A. Helmuth nustatė, kad vienas svarbiausių betoną ardančių poveikių užšaldymo ir atšildymo metu yra neužšalusio vandens judėjimas betono porose neužšalusių zonų kryptimi, kapiliarinėse porose susidarant vandens hidrostatiniam slėgiui. Slėgio jėga priklauso nuo užšalusio vandens kiekio kapiliarinėse porose. Autoriai teigia, kad, vykstant betono užšaldymui ir atšildymui druskų tirpaluose, betono irimas dėl cikliško užšaldymo ir atšildymo poveikio suintensyvėja, nes, esant druskų koncentracijų skirtumams, skystoje fazėje atsiranda osmosinės jėgos, skatinančios osmosinio slėgio susidarymą cementinio akmens porose ir kapiliaruose. Tuomet betono irimo procesas gali pagreitinėti iki 4–5 kartų. Hidrotechninio betono cementinio akmens irimas dėl šalčio ir druskų poveikio yra pagrindinė hidrotechnikos konstrukcijų irimo priežastis (Vektaris, Vilkas 2006). J. Valenza teigė, kad osmosinis slėgis nėra pagrindinė betono irimo priežastis, veikiant natrio chlorido tirpalu (Valenza *et al.* 2007). Tačiau kitas mokslininkas teigia, kad osmosinis slėgis pagreitina irimo procesą iki penkių kartų (Šelih 2010). Todėl reikėtų atsižvelgti, bet nevertinti osmosinio slėgio kaip pagrindinės hidrotechninio betono irimo priežasties. Kita grupė mokslininkų ištyrė, kad ne druskų poveikis, o druskų kiekis ir jų užšalimas betono porose turi įtakos betono irimo procesui (Kaufman 2004). B. Amini, S. Tehrani ištyrė bendrą jūros vandens ir jo kiekio poveikį betono irimo mechanizmui, vykstant užšaldymo ir atšildymo ciklams. Minėtų mokslininkų atliktų turimų rezultatų parodė, kad jūros vandens kiekis, patenkantis į betoną, didina betono irimą. Druskos, esančios jūros vandenyje, sukelia didesnę betono irimą nei vanduo be druskų (Amini, Tehrani 2011). Jie nustatė jūros vandens, patenkančio į betoną, kiekį, kuris padidina betono tankį, užšaldymo ciklą poveikį iki dviejų kartų, sumažina betono porų užšalimo temperatūrą (Basheer, Cleland 2006). Kitas svarbus vandens kiekio poveikis betono irimui, vykstant užšaldymo ir atšildymo ciklams, yra cheminių reakcijų greičio padidėjimas tarp sūraus vandens ir betone esančių komponentų. Mokslininkų pateiktos išvados dėl vandens kiekio padidėjimo ir jo sukiamų įtrūkių skaičiaus ir gylio padidėjimo turi įtakos betono intensyvaus irimo mechanizmo analizei (Copuroglu 2006). Rezultatai taip pat parodė, kad vandens ir cemento santykis turi didelę įtaką betono atsparumui daugkartiniams užšaldymo ir atšildymo ciklams veikiant druskingam jūros vandeniui, minėti poveikiai intensyviai ardo betoną iki suirimo (Amini, Tehrani 2011). Padidintą

žalą betonui sukelia poveikiai (cheminės reakcijos), vykstantys tarp betoną sudarančių sudedamųjų medžiagų ir jūros vandens. Cheminis jūros vandens poveikis betonui gali atsirasti dėl kalcio oksido išplovimo iš betono ir cemento hidratacijos produktų skilimo (Wang *et al.* 2006). Iš pateiktų mokslininkų tyrimų rezultatų galima daryti išvadą, kad betonas, veikiamas jūros aplinkoje esančio druskingo vandens ir chlorido jonų, kurių įsiskverbimas į gilesnius naudojamo betono sluoksnius sukelia minėto hidrotechninio betono irimą, pablogina savo eksploatacines savybes. Hidrotechninis betonas, naudojamas jūros aplinkoje, turi būti nepralaidus druskų tirpalams (chloridams ir sulfatams), kurie sukelia armatūros koroziją ir betono irimą.

Hidrotechninio betono atsparumas jūros aplinkos poveikiui, kaip ir atsparumas užšaldymo ir atšildymo poveikiui, priklauso nuo cemento mineralinės sudėties, betono vandens pralaidumo ir nuo jį veikiančių cheminių tirpalų. Literatūroje minima, kad vienas iš betono vandens pralaidumo ar įgeriamumo sumažinimo būdų yra mineralinių priedų, pvz., aukštakrosnių šlakų, naudojimas betone (Chen Youzhi, Pu Xinchenn 2001).

Cementinio akmens sorbcijos ir desorbcijos parametrai, atsparumas užšaldymo ir atšildymo ciklų poveikiui priklauso nuo vandens ir cemento santykio, porų bei kapiliarų dydžio, jų pasiskirstymo, uždaro. Cementinio akmens atsparumą šalčiui sumažina kapiliarai ir atviros poros, kurių kiekis priklauso nuo V/C santykio. Didėjant įtraukto oro kiekiui iki tam tikros ribos, sukietėjusio betono atsparumas šalčiui didėja. Nustatytas įtraukto oro kritinis kiekis atspariame šalčiui betone yra 3 %. Vadinasi, galima daryti išvadą, kad betono, cementinio akmens stiprumas ir ilgaamžiškumas priklauso nuo cemento sąnaudų betone ir V/C santykio, kurį didinant betono kokybė blogėja (Vektaris 2006).

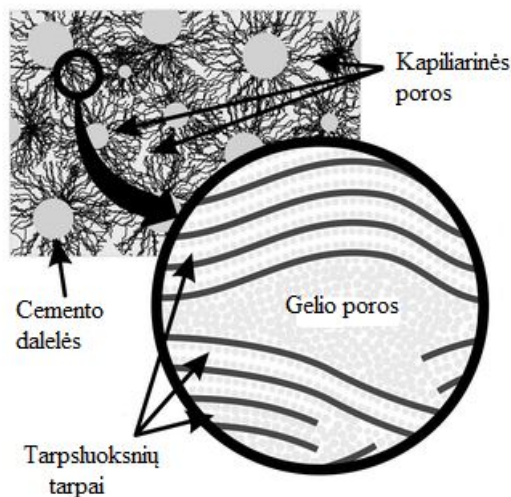
Statant hidrotechnikos konstrukcijas iš hidrotechninio betono rekomenduojama naudoti cementą, atsparų druskų poveikiui. Tokio tipo cemento klinkeryje yra ribojami trikalcio silikato (C_3S) – 50 %, trikalcio aluminato (C_3A) – 5 % mineralų kiekiai (Tsivilis *et al.* 1999).

Hidrotechninio betono destrukcija intensyviausiai pasireiškia dėl sulfatinės, šarminės korozijos bei užšaldymo ir atšildymo ciklų poveikio. Hidrotechninis betonas suyra esant dideliems įtempiams, kurie pasireiškia dėl neleistinų betono deformacijų, kintant jo tūriui. Todėl dažniausi hidrotechninio betono suirimo atvejai priskiriami ardomajam užšaldymo ir atšildymo poveikiui (Skominas 2007).

Konglomerato arba betono atsparumas šalčiui daugiausia priklauso nuo jo poringumo. Cementiniame akmenyje yra įvairaus dydžio porų, kurios pagal formą, dydį gali būti skirstomos į tris grupes: kapiliarinės poros, gelio poros ir oro poros. Kapiliarinės poros susidaro sukietėjusiame cemento akmenyje, išgaravus vandens pertekliui. Kapiliarinių porų skersmuo gali būti nuo 0,1 iki

10 μm , jų kiekis cemento akmenyje gali būti įvairus ir tiesiogiai priklausomas nuo laisvojo vandens kiekio bei cemento hidratacijos laipsnio (Skripkiūnas 2007). Mokslininkai, tiriantys poringą betoną, taip pat teigia, kad kapiliarinių porų kiekis cementiniame akmenyje priklauso nuo vandens kiekio arba nuo V/C santykio ir cemento hidratacijos laipsnio. Cementiniame akmenyje esančios kapiliarinės poros būna užpildytos vandeniu arba oru, jų skersmuo siekia nuo 0,1 iki 10 μm ; oro poros dažniausiai būna sferinės formos, o jų skersmuo siekia nuo 50 iki 100 μm (Baltakys 2009). Gelio poros yra labai smulkios, vanduo jose fiziškai surištas ir neužšąla esant net labai žemai ($-70\text{ }^{\circ}\text{C}$) temperatūrai.

Gelio poros yra gerokai smulkesnės už kapiliarines poras, kurių dydis siekia nuo 15 iki 20 μm . Gelio porų kiekis cemento akmenyje daro įtaką tik cementinio akmens traukumui ir valkšnumui, kitos cementinio akmens savybės, taip pat ir ilgaamžiškumas, beveik nekeičia (1.11 pav.) (Vektaris 2006).



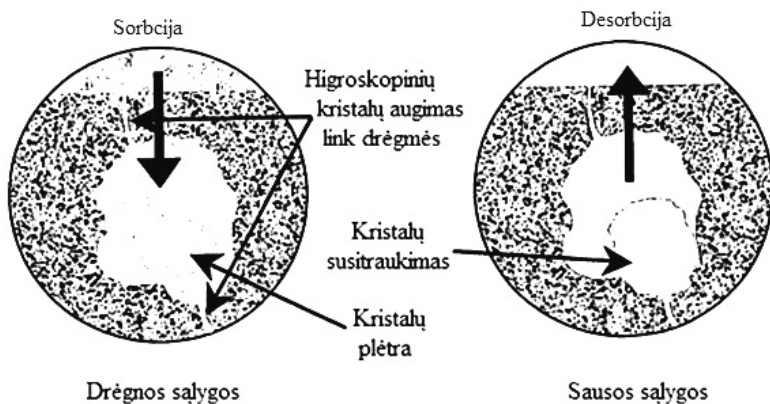
1.11 pav. Cementinio akmens gelio poros ir kapiliarinės poros
(Kowalczyk *et al.* 2014)

Fig. 1.11. Gel pores and capillary pores in hardened cement paste
(Kowalczyk *et al.* 2014)

Oro poros, kurios susidaro cementiniame akmenyje, yra stambiausios ir gali turėti įtakos konglomerato atsparumui šalčiui, nes jų forma panaši į sferinę formą, jos yra uždaros, jų dydis siekia nuo 50 iki 100 μm (Venčkauskas *et al.* 2013). Oro poros gali turėti neigiamą įtaką hidrotechninio betono stiprumui, bet gali padidinti vandens nelaidumą ir atsparumą šalčiui, o tai turi didelę hidrotechninio betono reikšmę naudojimui (Skripkiūnas 2007).

1.3. Jūros vandens įtaka betono korozijos procesams

Naudojamas hidrotechninis betonas turi būti atsparus ne tik mechaniniams poveikiams, bet ir agresyviems cheminiams bei fiziniams veiksniams. Hidrotechninį betoną neigiamai veikia Baltijos jūros vanduo, kuriame yra tam tikri druskų kiekiai bei daug kartų pasikartojantys sudrėkimo ir džiovimo (sorbcija ir desorbcija) procesai, nuolat pasikartojantys užšaldymo ir atšildymo procesai. Šių veiksmų poveikis apibrėžiamas fizine ir chemine betono korozija (Bazant 2015). 1.12 paveiksle pateikta sorbcijos procesų schema betone.



1.12 pav. Cementinio akmens sorbcijos procesai betone (Bazant 2015)

Fig. 1.12. Sorption processes in concrete hardened cement paste (Bazant 2015)

Hidrotechninio betono kapiliarinį sudrėkimą sukelia jūros vandens patekimas į kapiliarus, kuriais jis kyla į viršų betoninėje hidrotechnikos konstrukcijoje. Mokslininkas K. Kumar savo knygoje nagrinėja betono korozijos tipus ir ją sukeliančias chemines reakcijas. Jo teigimu, vizuali apžiūra paprastai yra vienas svarbiausių betono įvertinimo būdų. Iš vizualinės apžiūros galima prognozuoti hidrotechninio betono pažeidimo laipsnį, irimo modelį ir ilgaamžiškumą (Kumar 2012).

Hidrotechninio betono struktūra turi būti atspari drėgmės poveikiui, jūros vandens įsiskverbimui į tolimesnius betono sluoksnius ir jos sukeliamai korozijai (Wang *et al.* 1998). Rusų mokslininkai teigia, kad drėgmės pernešimas kapiliarais betone yra sudėtingas procesas dėl labai didelio kapiliarų kiekio ir jų skersmens, kuris siekia nuo $1,5 \times 10^{-8}$ m iki 0,1 mm. Nuo šio sudėtingo proceso priklauso įvairiapusiš ir skirtingomis kryptimis drėgmės pernešimas betone. Todėl svarbus betono mikrostruktūros parametras, naudojamas dispersinėje sistemoje, yra difuzijos koeficientas, nusakomas drėgmės kiekiu, pernešamu tam

tikrame plote per tam tikrą laiką. Difuzijos koeficientas yra svarbus tiek CO₂ dujų difuzijos, tiek chloridų difuzijos procesams, kurie sukelia armatūros koroziją hidrotechnikos konstrukcijose (Mangat *et al.* 1999).

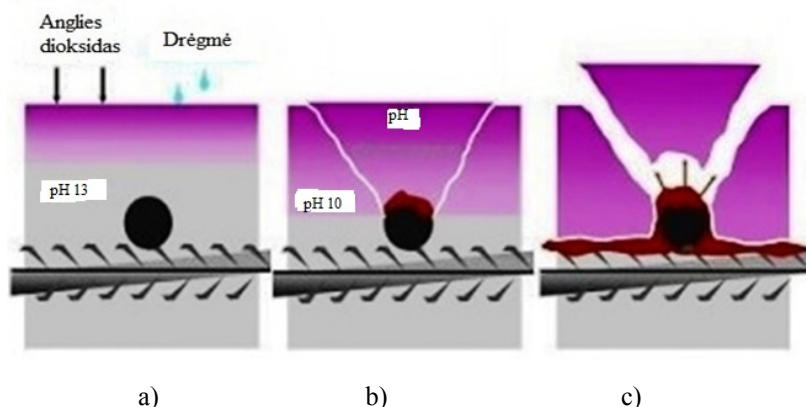
Dėl sorbcijos proceso betone sudėtingumo difuzijos koeficientą siūloma apskaičiuoti taikant matematinius modelius, įvertinant ir naudojant tam tikrus atliktų eksperimentinių tyrimų rezultatų dydžius. Sorbcijos procesai susideda iš drėgmės įgėrimo į betono struktūrą bei difuzijos procesų pačiame betone (sorbcijos) ir drėgmės išdžiuvimo (desorbcijos). Jai apskaičiuoti taikomos skirtingos empirinės priklausomybės. Mokslininkai ištyrė drėgmės įgeriamumo ir drėgmės džiuvimo procesus ir teigia, kad difuzijos koeficiento betone dydis turi būti nustatomas priartinant prie tikrų aplinkos sąlygų. Rozentalis teigia, kad difuzijos koeficiento betone nustatymas grindžiamas kapiliariniu įgėriu ir turi būti nustatomas eksperimentiniais tyrimais (Kačinskis 2004; Kukuškinas 2002; Rozentalis 1979).

Kapiliarinis sudrėkimas būdingas Klaipėdos uosto hidrotechnikos konstrukcijoms – krantinėms, nes jos yra nuolat veikiamos jūros vandens skirtinguose paviršiuose arba lygiuose. Jūros vandens pakilimo kapiliarais aukštis priklauso nuo betone esančių kapiliarų skersmens ir kapiliarų sienelių paviršiaus drėkinimo. Dėl difuzijos proceso jūros vanduo iš drėgnesnio betono paviršiaus juda sausesnio paviršiaus link, dėl savo specifinės cheminės sudėties sukeldamas cementiniame akmenyje tam tikrus korozinius procesus (Rozentalis *et al.* 1969).

Korozinius procesus betone nuo XIX a. pabaigos tyrė daugelis mokslininkų: V. Moskvinas, A. Baikovas, V. Kindas, V. Čarnomskis ir kiti. Jie atliko eksperimentinius tyrimus ir nustatė, kad betonas, veikiamas jūros aplinkos, turi būti atsparus cheminiams poveikiams (jūros vandens poveikiams). Mokslininkai pateikė rekomendacijas, kurios padidina betono ilgaamžiškumą, tačiau, praėjus tam tikram laikui, jūros aplinkos veikiamame betone nuolat vyksta betono irimo procesai, tad reikalingi papildomi tyrimai, atitinkantys šiuolaikinio mokslo lygio pasiekimus (Moskvinas *et al.* 1949, 1980; Baikovas 1978; Kindas 1977; Čarnomskis 1988).

Vienas svarbiausių hidrotechninio betono, naudojamo jūros aplinkoje, korozijos tipų – karbonizacija, kurios greitis priklauso nuo CO₂ dujų difuzijos proceso betone ir CO₂ poveikių reakingumo produktams sąveikos su betone esančiais cemento hidratacijos produktais (Rozentalis *et al.* 1969). M. Schmidt, E. Fehling, T. Teichmann, K. Bunje, R. Bornemann tyrimais nustatyta, kad betono karbonizacija vyksta betone esant drėgnam (apie 60 %) orui ir aukštai temperatūrai. Įrodyta, kad karbonizacijos procesui turi įtakos cemento tipas, betono tankis, poringumas ir net oro kiekis mišinyje. Vykstant karbonizacijai betono stipris didėja, karbonizacija didina betono traukimąsi, tačiau mažina pH (Gurskis 2008; Schmidt *et al.* 2003).

Pagrindiniai veiksniai, lemiantys karbonizacijos greitį, yra rišamosios medžiagos kiekis betone, vandens ir rišiklio santykis betone, cemento hidratacijos laipsnis, CO₂ kiekis ir santykinė drėgmė betone (Hajkova 2015; Jiang 2002) (1.13 pav.).



1.13 pav. Hidrotechninio betono karbonizacijos korozija: a) anglies dioksido ir drėgmės poveikis; b) mikroplyšiai, sumažėjęs betono šarminumas; c) armatūros korozija (Friend 2013)

Fig. 1.13. Hydrotechnical concrete carbonation corrosion: a) carbon dioxide and moisture effect; b) microlipples, reduced alkalinity of concrete; c) reinforcement corrosion (Friend 2013)

Cheminio betono irimo hipotezę ginantys autoriai teigia, kad teoriškai tarp dažniausiai naudojamos ledą tirpdančios druskos tirpalo ir kalcio hidroksido betone gali įvykti tokia kalcio hidroksido išplovimo iš betono reakcija – „nušarminimas“, kurioje susidaro vandenyje tirpūs junginiai – kalcio chloridas ir natrio šarmas. Reakcijoje susidaręs tirpus kalcio chloridas gali reaguoti su trikalčio aluminatu, sudarydamas betoną ardančios plėtriosios Friedelio druskos ($\text{Ca}_3\text{A} \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) kristalus, kuri ardo betoną (Jiang *et al.* 2015). Šarminumo sumažėjimas cementiniame akmenyje gali spartinti armatūros koroziją, ypač papildomai veikiant druskingam jūros vandeniui, kuris dėl difuzijos procesų pasiekia armatūros paviršių per apsauginį betono sluoksnį.

Italų mokslininkai, nagrinėdami armatūrinio plieno korozijos atvejus, teigė, kad kita dar agresyvesnė ledą tirpdanti druska – kalcio chloridas – gali reaguoti su cementiniame akmenyje (betone) esančiu kalcio hidroksidu ir sudaryti kalcio oksichlorido hidratą (Reyes *et al.* 2010, 2016). Mokslininkai siūlo hidrotechniniam betonui parinkti kuo tankesnę betono struktūrą, tinkamai parenkant cemento tipą ir optimizuojant betono sudėtį. V. Kindas teigia, kad didelį poveikį betonui, veikiamam jūros aplinkos, turi difuzijos procesas, sukeliantis korozinius

procesus betono struktūroje. Jis teigia, kad, vertinant korozijos proceso greitį, būtina vertinti CaO išplovimą iš betono, kuris yra difuzijos proceso rezultatas, ir pasiūlė korozijos procesą suskirstyti į tris ardančios agresyvosios aplinkos tipus. Pirmo tipo poveikis, veikiant agresyviai jūros aplinkai, yra priskiriamas cementinio akmens tirpių junginių ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) išplovimui iš betono, kuris labai priklauso nuo difuzijos procesų. Esant antro tipo poveikiui hidrotechniniame betone vyksta cheminės mainų reakcijos betono struktūroje tarp cemento hidratacijos produktų ir jūros vandenyje esančių medžiagų (druskų) (Kindas 1967). Trečiam poveikio tipui priskiriamas kietos fazės betono tūrio didėjimas, kuris gali būti prieš tai įvardytų pirmo ir antro tipo poveikių pasekmė.

Anksčiau minėti korozijos procesai pasireiškia hidrotechniniame betone tada, kai sukiėtusio betono porose ir kapiliaruose išsikristalيزuoja kietosios medžiagos. Korozijos proceso priežastis – tirpaus vandenyje $\text{Ca}(\text{OH})_2$ išplovimas. Veikiant hidrotechninį betoną jūros vandeniui, ištirpsta kalcio hidroksidas, kuris pasišalina kartu su jūros vandeniu, dėl to mažėja betono tankis ir stiprumas. Moskvinas teigia, kad jei iš betono išplaunama 15–30 % kalcio oksido nuo bendro betone esančio jo kiekio, tai betono stiprumas sumažėja iki 40–50 %. Išplautas kalcio hidroksidas hidrotechninio betono paviršiuje palieka baltas „apnašas“. Toks nuolatinis tirpių medžiagų išplovimas iš hidrotechninio betono sukelia papildomus sudrėkimo ir išdžiuvimo procesus, dėl to atsiranda betono medžiagos traukimosi ir brinkimo deformacijos, tirpios druskos išsikristalيزuoja sukiėtusio cemento porose ir paviršiuje.

Mokslininko A. Minaso teigimu, tris mėnesius veikiant betoną 5 % koncentracijos druskų tirpalais, šie kapiliarais įsiskverbia į sukiėtusį cementinį akmenį, kartu iš jų išgaruojant vandeniui. Druskų tirpalų koncentracijai didėjant iki sočios būsenos, atsiranda kristalai, kurie palaipsniui užpildo visas poras. Vykstant šiam procesui, atsiranda didelis kristalų slėgis ir įtempiai į porų ir kapiliarų sienelės, kurie sukelia sukiėtusio cemento ir betono deformacijas ir vėliau jo irimo procesą. Minasa ištyrė, kad kristalų slėgis siekia iki $4,4 \text{ kg/cm}^2$, naudojant Na_2SO_4 tirpalą, $3,6 \text{ kg/cm}^2$, naudojant MgSO_4 tirpalą, $2,7 \text{ kg/cm}^2$, naudojant CaSO_4 tirpalą (Minasas 1970). Todėl hidrotechninio betono sudėtis turi būti parinkta atsižvelgiant ne tik į cemento kiekį ir V/C santykį, bet ir jo sorbcinius parametrus, kuriuos galima reguliuoti mineraliniais priedais (šlakais, pelenais, SiO_2 mikrodulkėmis ir kt.).

A. J. Negi ir kiti, tyrę sulfatinę koroziją, nustatė, kad, modifikuojant betoną mineraliniais priedais, galima padidinti betono atsparumą sulfatinei korozijai. R. L. Idriss tyrimai nustatė, kad SiO_2 mikrodulkių priedas, keisdamas betono poringumo parametrus ir difuzijos procesus, stabdo betono sulfatinę koroziją ir mažina armatūros korozijos procesus (De Zementowac *et al.* 1997; Odriss 2000; Jiang 2002).

Hidrotechninio betono, naudojamo jūros aplinkoje, ilgaamžiškumas turi būti vertinamas kompleksškai, todėl ypatingą dėmesį reikia kreipti į betono struktūroje vykstančius procesus – drėgmės, jūros vandens skverbimąsi į gilesnius betono struktūros sluoksnius, t. y. į difuzijos procesus, dėl kurių sukeliami skirtingi betono koroziniai procesai (Aleksejev *et al.* 1990).

1.4. Mineralinių priedų įtaka hidrotechninio betono ilgaamžiškumui

Betonas – kompozicinė medžiaga, sudaryta iš kelių komponentų, jos sandara yra sudėtinga, kelių lygmenų, ją sudarantys komponentai yra skirtingo dydžio (Skripkiūnas 2007). Betono mikrostruktūra yra cementinio akmens, kurį sudaro nehidratavusios klinkerio dalelės, hidratacijos metu susidarę cemento hidratacijos produktai, struktūra. Cementinio akmens hidratacijos produktai – kalcio hidrosilikatai, kurie susidaro cemento hidratacijos metu, būna labai smulkių submikrokristalų pavidalo. Hidrosilikatų sudėtis priklauso nuo CaO ir SiO_2 santykio. Kalcio hidroksido kristalai susidaro cementinio akmens porose hidrosilikatiniame gelyje tarp klinkerio dalelių, jie dar gali būti sujungti su kitos mineralinės sudėties mikrokristalais (Skripkiūnas 2007). Be cementinio akmens, didesnę betono tūrio dalį sudaro betono užpildai, kurie gaunami iš vietinių mineralinių medžiagų telkinių. Tiek nuo cementinio akmens mikrostruktūros, tiek nuo užpildų parametrų priklauso betono ilgaamžiškumas.

Mineraliniai priedai sudaryti iš mineralinės medžiagos ir naudojami betono sudėčiai modifikuoti, gerinant mišinių technologines ir suketėjusio betono savybes bei ilgaamžiškumą. Mineraliniai priedai didina betono mišinio nelaidumą vandeniui, atsparumą šalčiui, atsparumą agresyvosios aplinkos poveikiui (Skripkiūnas 2007; Martynaitis 1974). Aktyvusis mineralinis priedas yra cemento smulkumo medžiagos, kuriose yra amorfinio silicio dioksido. Šios medžiagos cementui hidratuojantis reaguoja su jo produktais (Navickas *et al.* 2005; Shirish *et al.* 2015).

O. Copuroglu tyrė betonus su dideliu mineralinio priedo – aukštakrosnių šlako kiekiu. Šio mokslininko gauti rezultatai turėjo teigiamą įtaką dėl aukštakrosnių šlako naudojimo cemento gamyboje, siekiant pagerinti atsparumą užšaldymo ir atšildymo ciklų bei druskų poveikiams (Copuroglu 2006). Betonus su šlako priedu tyrė daugelis kitų mokslininkų (Sutcu *et al.* 2013).

Cementai su šlako priedu pasižymi lėtesniais rišimosi terminais, tolygesne temperatūros kilimo kreive ir pasiekia tinkamas projektines fizikines ir mechanines savybes po standartinės kietėjimo trukmės (Shehata *et al.* 2011; Paya *et al.* 2012, 2014). Atkreiptinas dėmesys į tai, kad reikėtų skirti šlako portlandcemenčius ir šlakinius cementus, nes, vadovaujantis LST EN 197-1

standarte pateiktais reikalavimais, šlako portlandcemenčiai yra CEM II/A-S, kuriuose yra 80–94 % portlandcemenčio klinkerio ir 6–20 % šlako, taip pat CEM II/B-S, kurių sudėtyje yra 65–79 % portlandcemenčio klinkerio, šlako – 21–35 %, o šlakinio cemento CEM III/A sudėtyje yra 35–64 % portlandcemenčio klinkerio, šlako 36–65 % bei CEM III/B sudėtyje yra 20–34 % klinkerio ir 36–80 % šlako. Nustatyta, kad šlakinis cementas hidratacijos metu šilumos išskiria mažiau, vyksta lėtesnė cemento hidratacija, todėl lėčiau didėja jo stiprumas. Šlakinis cementas yra atsparus druskų tirpalų poveikiui, nes šlakiniame cemento yra mažiau trikalčio aluminato, jam hidratuojant susidaro mažai $\text{Ca}(\text{OH})_2$, kuris reaguoja su sulfatais, dėl to nesusidaro betoną ardančių junginių. Šlakinio cemento didesnis vandens nepralaidumas, o tai taip pat labai aktualu Baltijos jūros vandens veikiamam betonui, nes cementinis akmuo, kuris susidaro vykstant hidratacijos procesui šlakiniame cemento, yra tankus, su vyraujančiomis smulkiomis poromis. Mokslininkai teigia, kad, naudojant atitinkamos sudėties granuliuotą aukštakrosnių šlaką, reikalavimai cemento mineralinei sudėčiai gali būti ne tokie griežti, t. y. C_3S ir C_3A kiekiai nenormuojami, o trikalčio aluminato (C_3A) mineralų kiekis klinkeryje gali siekti iki 8 % ir daugiau. Minėti mineraliniai priedai atlieka ne tik laisvų kalkių betone sujungimo procesą, kurios atsiranda kietėjant cementui, bet ir gerina betono savybes. Tačiau teigiama, kad kai kurie mineraliniai priedai gali mažinti betono atsparumą šalčiui (Aleksejev *et al.* 1998; Schilddyakov *et al.* 2016).

Daug literatūros šaltinių rodo, kad portlandcemenčio atsparumą jūros aplinkos poveikiui didina granuliuoti aukštakrosnių šlakai, atitinkantys Europos standarto LST EN 197-1 keliamus reikalavimus. Aukštakrosnių šlake CaO , MgO , SiO_2 kiekių suma turi būti ne mažesnė kaip 2/3 aukštakrosnių šlako masės.

Akmens anglies pelenai – tai mineraliniai junginiai, liekantys sudegus organinėms medžiagoms. Akmens anglies pelenai skirstomi į pelenus, kurių sudėtyje yra ne daugiau kaip 5 % CaO , ir pelenus, kurių sudėtyje 15–35 % CaO . Mokslininkai nustatė, kad pelenų sudėtyje yra nemažai ir kitų makro- ir mikroelementų, tokių kaip mangano, magnio, silicio, cinko, vario ir švino. Akmens anglyje esančios molio, kvarco ir kitos priemaišos išsilydo, o patekusios į vėsesnės temperatūros zonas ataušta, sudarydamos sferines pelenų daleles (Anspok *et al.* 1998). Kai kurių autorių darbuose aptariamas akmens anglies pelenų poveikis betono savybių pagerinimui, optimizuojant betono sudėtį, pakeičiant atitinkamą cemento kiekį akmens anglies pelenais (Bajaj *et al.* 2012). Mokslininkai nustatė, kad nėra optimalaus kiekio pelenų, kurį galėtume dėti į visus betono mišinius, priklausomai ne tik nuo pačių pelenų, bet ir nuo cementinio akmens bei betono sudėčių bei reikalavimų. Apibendrinant kai kurių mokslininkų pateiktus rezultatus, matyti, kad optimalus lakiųjų pelenų kiekis iki 25 % (Panteleeva 2013; Žežel 2011; Bastos *et al.* 2016).

Daugelyje mokslinių straipsnių nurodoma teigiama SiO_2 mikrodulkių priedo, kaip aktyvaus mineralinio priedo, įtaka betonui – jis modifikuoja betono mikrostruktūrą, padaro ją labiau homogenišką, sumažindamas didelių porų skaičių, sumažina vandens ir jo garų pralaidumą, padidina betono stiprumą, ypač naudojant superplastiklius. SiO_2 mikrodulkių mineralinis priedas veikia kaip pucolaninis priedas, nes aktyviai reaguoja su kalcio hidroksidu betone dėl didelio savitojo paviršiaus ploto ir esančio didelio amorfinio silicio dioksido kiekio (Kanthi, Kavitha 2014). SiO_2 mikrodulkių kaip aktyvaus mineralinio priedo veikimas paaiškinamas tuo, kad SiO_2 mikrodulkių dalelės yra vidutiniškai 0,1 μm dydžio, t. y. apie 100 kartų smulkesnės už cemento daleles. Jos užpildo tarpus tarp cemento dalelių ir sudaro daug tankesnę cementinio akmens struktūrą. Be to, jos sutankina sluoksnį tarp užpildo paviršiaus ir cementinio akmens (kontaktnį sluoksnį) taip pat sumažina jo storį (Nazeer *et al.* 2014).

Mokslininkai, atlikę tyrimus, patvirtino, kad SiO_2 mikrodulkės kaip aktyvus mineralinis priedas padidina betono gniuždymo stiprį, padidina ilgaamžiškumą, pagerina betono mikrostruktūrą, taip padidindamos betono atsparumą agresyviosios aplinkos poveikiui (Rasol 2015).

1.5. Chloridų difuzijos įtaka gelžbetoninių hidrotechnikos konstrukcijų irimo procesams

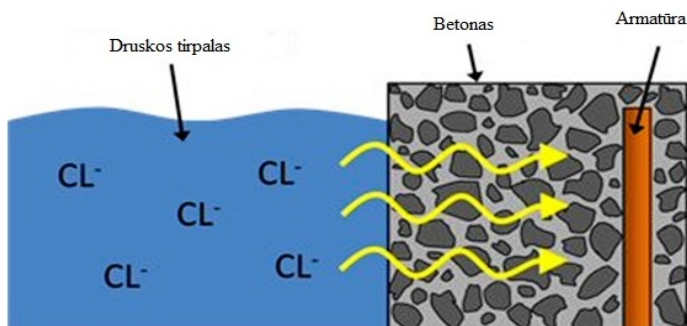
Naudojant hidrotechninį betoną jūros aplinkoje, per kapiliarus į vidinius betono sluoksnius iki armatūros patenka jūros vanduo su tam tikru chloridų kiekiu. Mokslininkai, atlikę jūros aplinkoje naudojamo betono tyrimus, nustatė, kad plačiai taikomi chloridų difuzijos rezultatų vertinimo kriterijai remiasi jonų difuzijos modeliais, kurie šiuo metu vis dar yra eksperimentinės būsenos, todėl nėra bendro metodo chloridų difuzijai betone įvertinti. Vertinant eksperimentinius duomenis galima teigti, kad gniuždymo stiprio reglamentavimas gali būti patikimiausias rodiklis vertinant ribinę betono naudojimo trukmę jūros aplinkoje, nenustatant betono chloridų difuzijos koeficiento (Merretz *et al.* 2003).

Hidrotechnikos statiniai, eksploatuojami jūros aplinkoje, t. y. druskingame jūros vandenyje (prieplaukos, bangolaužiai, pirsai, krantinės, molai ir kt.), yra labiausiai chloridų pažeidžiamos gelžbetoninės konstrukcijos. Jūros vandenyje esantys ištirpę chloridai per hidrotechnikos statinių konstrukcijų paviršių, t. y. betoną, skverbiasi nedideliu greičiu, tačiau prasiskverbimas pagreitėja, jei betone atsiranda plyšių. Veikiant kitiems jūros aplinkos poveikiams ir betone daugėjant plyšių, chloridai gali greičiau patekti į vidinius betono sluoksnius, taip sukeldami armatūros plieno koroziją (1.14 pav.). Nustatyta, kad daugelis mokslininkų chloridų difuzijos rezultatus, betoną panardinę į druskų (CaCl_2 ir NaCl) tirpalus, gavo skirtingus, todėl iki šios dienos nėra vieningos nuomonės, kokią

metodiką taikyti tiriant armuoto betono, naudojamo jūros aplinkoje, ilgą amžiusumą. Įprastai visi mokslininkai rezultatams apdoroti taiko Ficko metodą. Tačiau jis ne visada gali būti taikomas, nežinant chloridų kiekio, tad nėra galimybių nustatyti chloridų difuzijos koeficiento dydžio (Lim 2000; Cao 2001; Khatri 2001; Guirguis 2009).

Literatūroje pateikti skirtingų mokslininkų eksperimentų rezultatai taikant kitus bandymo metodus: Puasono lygtį, kuri aprašo jonų srautą; *Multi-phase* reakcijos, kurios apibūdina kelių srautų reakcijas, NT BUILD 443 metodą; AASHTO T277 ir ASTM C1202 metodus (Song *et al.* 2014; Ghosh *et al.* 2011).

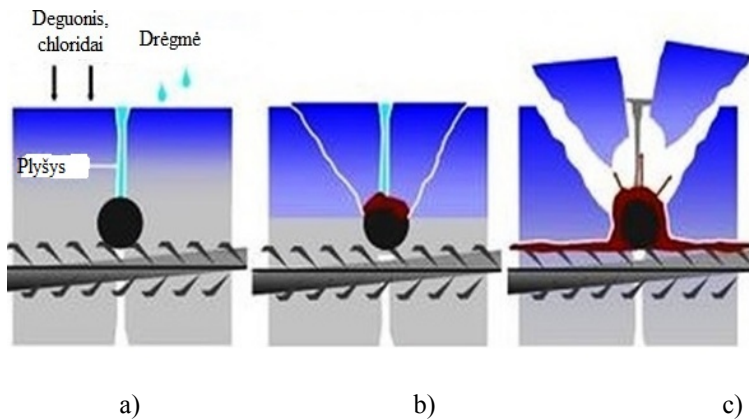
Gelžbetoninių konstrukcijų naudojimo jūros aplinkoje metu aplink armatūros strypą, reaguojant metalui su vandeniu, susidaro papildomas geležies oksidas, kuris vidiniame betono sluoksnyje dėl tūrio padidėjimo sukelia vidinius įtempius, betone sudarydamas plyšius. Susidarę plyšiai betone leidžia jūros vandeniui kartu su jame esančiais chloridais vis didesniais kiekiais patekti prie armatūros, taip sukeldami intensyviuos armatūros korozijos procesus (Friend 2013).



1.14 pav. Chloridų penetracija hidrotechniniame betone, naudojamame jūros aplinkoje (Paul *et al.* 2012)

Fig. 1.14. Chloride penetration through hydrotechnical concrete, exploited in sea Environment (Paul *et al.* 2012)

Įvertinus daugybės mokslininkų atliktų eksperimentų rezultatus, galima teigti, kad chloridų difuzija yra svarbus hidrotechninio betono, naudojamo jūros aplinkoje, ilgą amžiusumą vertinimo parametras. 1.15 paveiksle pateiktas armatūros korozijos hidrotechniniame betone mechanizmas dėl chloridų difuzijos. Jis parodo, kad armatūros korozija vyksta būtent dėl chloridų skverbties per betoną, naudojamą jūros aplinkoje. Didėjant chloridų difuzijos koeficientui betone, didėja armatūros korozijai rizika (Friend *et al.* 2013).



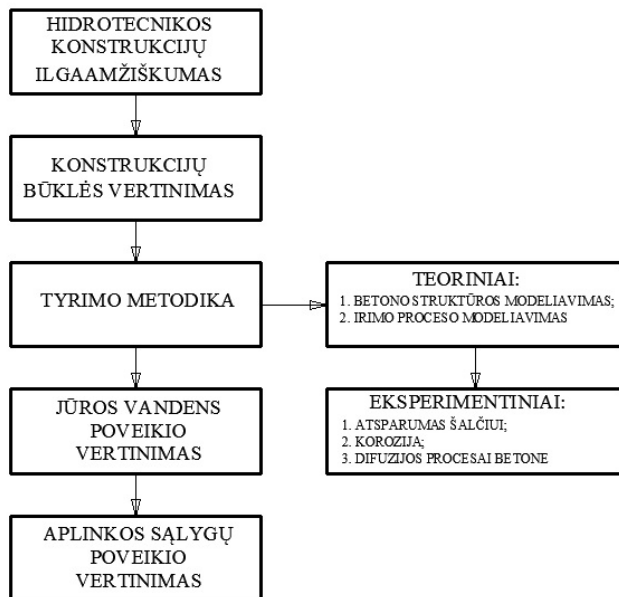
1.15 pav. Armatūros korozijos hidrotechniniame betone irimo procesas dėl chloridų difuzijos: a) anglies dioksido ir drėgmės poveikis per betone esančius mikroplyšius; b) druskų poveikis betonui; c) betono irimas per plyšius (Friend *et al.* 2013)

Fig. 1.15. Process of reinforcement corrosion in hydrotechnical concrete due to chloride penetration: a) carbon dioxide and moisture effect; b) salt effect on concrete; c) concrete breakdown through cracks (Friend *et al.* 2013)

Apibendrinus galima teigti, kad chloridų difuzija hidrotechniniame betone, naudojamame jūros aplinkoje, yra svarbus betoninių konstrukcijų ilgą amžių rodiklis, kuris turi būti vertinamas parenkant reikalavimus hidrotechniniam betonui. Šiuo metu chloridų kiekis pačiame betone ribojamas pagal norminių dokumentų reikalavimus. Jis lygus 0,2–0,4 % nuo cemento masės armuotame betone ir 0,1–0,2 betone su įtempta plienine armatūra (Gondwal *et al.* 2016; LST EN 206). Tačiau nėra reikalavimų chloridų difuzijos koeficientui betone iš aplinkos. D. H. Christolm pateikė daugybę eksperimentinių difuzijos koeficiento nustatymo betone įvairiais metodais rezultatų (Christolm *et al.* 2001). Tačiau tyrimų rezultatai neleidžia pateikti vieno chloridų difuzijos betone prognozavimo metodo, todėl šiuo metu prognozuojant chloridų difuzijos rodiklius betone reikia atsižvelgti į betono stiprumo klasę ir vandens nepralaidumo markę. Galima chloridų difuzijos koeficientą nustatyti eksperimentiniu būdu, taikant Fiko antrojo dėsnio matematinę išraišką. Mokslininkai pasiūlė chloridų skverbties gylio skaičiavimo modelį, grindžiamą nebaigtinių skirtumų metodu, ir, skaitmeniniu būdu imituodami betono bandinyje vykstančią chloridų difuziją, apskaičiavo difuzijos koeficientą taikydami Nersto ir Planko lygtį, kuri nusako chloridų migraciją erdvėje per laiką. Išsamus membranos potencialo migracijos bandymo paaiškinimas pateiktas mokslininkų Lizarazo – Marriagaa ir Claisse (Lizarazo – Marriagaa *et al.* 2009).

1.6. Jūros aplinkos veikiamų hidrotechnikos statinių (betono) ilgaamžiškumo vertinimo schema

Atlikus įvairių veiksnių poveikio hidrotechnikos statiniams analizę, sudaryta hidrotechnikos statinių ilgaamžiškumo vertinimo schema, pateikta 1.16 paveiksle.



1.16 pav. Hidrotechninio betono, naudojamo jūros aplinkoje, ilgaamžiškumo vertinimo schema

Fig. 1.16. Hydrotechnical concrete, exploiting in sea environment, durability evaluation scheme

Vertinant hidrotechnikos konstrukcijų techninę būklę ir projektuojant naujas hidrotechnikos konstrukcijas, taikant specialias tyrimų metodikas, turi būti vertinama eksploatuojamų konstrukcijų būklė, jūros vandens ir aplinkos poveikis. Teorinius tyrimus galima atlikti modeliuojant betono struktūrą ir irimo procesus, veikiant jūros aplinkos poveikiams. Eksperimentinius tyrimus galima atlikti tiriant betono atsparumą užšaldymo ir atšildymo ciklams, difuzijos procesus betone ir korozijos procesus betone. Šiuo metu, nesant teorinių pagrindų, būtina taikyti eksperimentinius tyrimo metodus, kuriuose galima numatyti kompleksinį anksčiau minėtų veiksnių poveikį betonui (Rozentalis *et al.* 2002).

1.7. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

Apibendrinus literatūros analizę, galima išskirti neigiamus jūros aplinkos veiksnius, ardančius hidrotechninį betoną (hidrotechnikos statinio gelžbetoninę konstrukciją):

1. Jūros vandens druskingumas, užšaldymo ir atšildymo ciklą skaičius, vėjo kryptis ir greitis, banguotumas, oro ir vandens temperatūros svyravimai.
2. Norint nustatyti betono, naudojamo jūros aplinkoje, ilgaamžiškumą eksperimentiniu būdu, reikalinga speciali bandymo metodika, vertinanti kompleksinį anksčiau minėtų veiksnių poveikį betono ir armatūros irimo procesus.
3. Hidrotechninio betono atsparumas BJA poveikiui gali būti didinamas racionaliai parenkant betono mišinio sudėtį, naudojant efektyvias chemines įmaišas, gerinančias betono mišinio technologines savybes bei aktyvius mineralinius priedus, kurie gerintų betono struktūrą, keičiant betono poringumo parametrus, sorbcines charakteristikas ir difuzijos parametrus.

Apibendrinus literatūros apžvalgą suformuluoti darbo uždaviniai:

1. Nustatyti charakteringas pažeidas, atsirandančias Klaipėdos uosto HTS betoninėse ir gelžbetoninėse konstrukcijose ir betono savybių pokyčius eksploatacijos metu.
2. Ištirti BJA sąlygas: jūros vandens druskingumą, užšaldymo ir atšildymo ciklą skaičių, vėjo kryptį ir greitį, banguotumą, oro ir vandens temperatūros svyravimus, įvertinant jų įtaką BJA naudojamo betono ilgaamžiškumui.
3. Parinkti tinkamą betono atsparumo BJA poveikiui bandymo metodiką, vertinančią visus pagrindinius tokioje aplinkoje naudojamą betoną ardančius poveikius.
4. Ištirti cemento tipo ir aktyvių mineralinių priedų įtaką cementinio akmens ir betono ilgaamžiškumui BJA sąlygomis, bei stambiojo užpildo mineralinės sudėties įtaką hidrotechninio betono ilgaamžiškumui.
5. Atlikti chloridų difuzijos bandymus ir nustatyti aktyvių mineralinių priedų poveikį chloridų difuzijai, kuris skatina armatūros koroziją betone, naudojamame BJA.

Tyrimams naudotos medžiagos ir betono atsparumo jūros aplinkai bandymų metodikos

Šiame skyriuje aprašomos tyrimams naudotos medžiagos ir bandiniai, jų paruošimas, apžvelgiami bandymų metodai ir bandymų įranga, naudoti atliekant tyrimus su cementiniu akmeniu ir betonu. Pateikiamos betono mišinių, modifikuotų aktyviaisiais mineraliniais priedais, sudėtys. Aprašytos bandinių formavimo, jų paruošimo eksperimentams ir bandymų metodikos.

Šio skyriaus medžiaga paskelbta trijuose moksliniuose straipsniuose (Lebedeva R. *et al.* 2016; Lebedeva R. 2015, 2013) ir pristatyta penkiose mokslinėse konferencijose bei trijuose seminaruose.

2.1. Medžiagos ir jų charakteristikos

2.1.1. Cementas

Eksperimentiniams bandymams naudotas portlandcementis su skirtingais mineraliniais priedais: CEM I 42,5 N (be priedų), CEM II/A-LL 42,5 N (su 17 % klinties priedu, pagal gamintojo pateiktus duomenis), CEM II/A-S 42,5 N (su

17 % aukštakrosnių šlako priedu, pagal gamintojo pateiktus duomenis), CEM III/B 32,5 N (su 70 % aukštakrosnių šlako priedu, pagal gamintojo pateiktus duomenis), pagamintas AB „Akmenės cementas“. Tyrimams naudoti cementai atitinka standarto LST EN 197-1: 2011 reikalavimus. Portlandcemenčių klinkerio cheminė ir mineralinė sudėtis pateikta 2.1 lentelėje, cementų fizikinės ir mechaninės savybės – 2.2 lentelėje.

2.1 lentelė. Portlandcemenčio klinkerio cheminė ir mineralinė sudėtis (pagal gamintojo pateiktus duomenis)

Table 2.1. Portland cement clinker chemical composition (according to producer data)

Cheminė sudėtis	Kiekis, %	Mineralinė sudėtis	Kiekis, %
SiO ₂	20,48	C ₃ S	56,60
Al ₂ O ₃	5,55	C ₂ S	15,76
Fe ₂ O ₃	3,58	C ₃ A	8,59
CaO	63,13	C ₄ AF	10,85
SO ₃	0,73	–	–
Cl ⁻	0,002	–	–
MgO	3,99	–	–
CaO _{laisvo}	0,86	–	–

2.2 lentelė. Cemento fizikinės ir mechaninės savybės (pagal gamintojo pateiktus duomenis)

Table 2.2. Cement physical and mechanical properties (according to producer data)

Cemento savybės	Cemento tipas				
	CEM I 42,5N	CEM I 42,5R	CEM II / A-LL 42,5N	CEM II/ A-S 42,5N	CEM III/B 32,5N-LH
Gniuždymo stipris po 2 parų	22±3	28±2	21±3	22±3	–
Gniuždymo stipris po 28 parų	50±3	54±3	47±3	51±3	41±3
Rišimosi pradžia, min	160	160	190	160	220
Rišimosi pabaiga, min	–	–	–	–	315
Tūrio pastovumas, mm	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0
Vandens sąnaudos, %	24,3	25,1	25,0	25,3	30,3
Liekana ant sieto 90 μm, %	3,5	1,5	4,3	2,9	0,3
Savitasis paviršius, cm ² /g	3500	3700	3600	3500	5000

Naudotų cementų mineralinė sudėtis (2.1 lentelė) rodo, kad cementuose vyrauja alitas (C_3S), kurio kiekis klinkeryje apie 60 %, o trikalcio aluminato kiekis apie 8,5 %. Visų tyrimams naudotų cementų aktyvumas siekia nuo 47 iki 54 MPa, išskyrus šlako cementą, kurio aktyvumas yra 41 MPa. Visų cementų sumalimo smulkumas (savitasis paviršius siekia 3500–3700 cm^2/g , išskyrus šlako cementą, kurio savitasis paviršius yra 5000 cm^2/g).

2.1.2. Mineraliniai priedai

Cementiniam akmeniui modifikuoti buvo naudojami tokie mineraliniai priedai: dolomito dulkės, malta karbonatinė opoka, aukštakrosnių šlakas, skystasis stiklas ir SiO_2 mikrodulkės. Hidrotechninio betono sudėtims modifikuoti buvo naudojami mineraliniai priedai: aukštakrosnių šlakas, lakiųjų pelenai ir SiO_2 mikrodulkės. Betonas buvo modifikuojamas mineraliniais priedais, skaičiuojant procentais nuo cemento kiekio pagal masę, pakeičiant jais analogišką cemento kiekį (Hooton 1986; Bharitkar, Kanase 2015). Aukštakrosnių šlako kiekis betone buvo keičiamas nuo 0 % iki 70 % nuo cemento kiekio derinant skirtingus cemento tipus ir jų kiekius. Betono mišinyje be šlako priedo buvo naudojamas CEM I tipo cementas, mišinyje su 17 % šlako – CEM II A/S tipo cementas, mišinyje su 35 % šlako – cementų CEM I 50 % ir CEM III/B 50 % mišinys, su 49 % šlako – cementų CEM I 30 % ir CEM III/B 70 % mišinys ir mišinyje su 70 % šlako – cementas CEM III/B. Lakiųjų pelenų kiekis betone buvo keičiamas nuo 0 % iki 70 % nuo cemento kiekio, pridedant atitinkamą lakiųjų pelenų kiekį į maišomą betono mišinį ir atitinkamai sumažinant cemento kiekį. SiO_2 mikrodulkių kiekis betone buvo keičiamas nuo 0 % iki 7 % nuo cemento kiekio, pridedant atitinkamą SiO_2 mikrodulkių kiekį į maišomą betono mišinį ir atitinkamai sumažinant cemento kiekį.

Tyrimams naudotų mineralinių priedų savybės ir cheminė sudėtis pateiktos 2.3–2.7 lentelėse (pagal gamintojo AB „Akmenės cementas“, AB „Dolomitas“, įmonės „Berchem“ duomenis).

2.3 lentelė. Dolomito dulkių savybės (pagal gamintojo duomenis)

Table 2.3. Dolomite dust properties (according to the data from the supplier)

Savybės	Charakteristika
Spalva	Gelsva
Piltinis tankis, kg/m^3	1232
Dalelių tankis, kg/m^3	2635
Dalelių savitasis paviršius, m^2/kg	300
Metilenmėlynojo rodiklio vertė MB_F , masės %	2,4

2.4 lentelė. SiO₂ mikrodulkių suspensijos savybės (pagal gamintojo duomenis)**Table 2.4.** Silica fume suspension properties (according to the data from the supplier)

Savybės	Charakteristika
Spalva	Pilka
Suspensijos tankis, kg/m ³	1402
Dalelių tankis, kg/m ³	2200

2.5 lentelė. Karbonatinės opokos savybės (pagal gamintojo duomenis)**Table 2.5.** Carbonate opoca properties (according to the data from the supplier)

Savybės	Charakteristika
Spalva	Pilka
Dalelių tankis, kg/m ³	2730
Dalelių savitasis paviršius, m ² /kg	1680

2.6 lentelė. Lakiųjų pelenų savybės (pagal gamintojo duomenis)**Table 2.6.** Fly ash properties (according to the data from the supplier)

Savybės	Charakteristika
Spalva	Pilka
Dalelių tankis, kg/m ³	2288
Dalelių savitasis paviršius, m ² /kg	994

2.7 lentelė. Mineralinių priedų cheminė sudėtis (pagal gamintojo duomenis)**Table 2.7.** Chemical composition of mineral additives (according to the data from the supplier)

Mineralinis priedas	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	CaO %	MgO %	K ₂ O %	Na ₂ O %	K.n.
Šlakas (aukšt.)	35,1	5,38	0,429	41,2	4,13	0,414	0,486	0,67
Lakieji pelenai	49,8	19,1	7,03	6,92	1,58	1,82	0,787	–
SiO ₂ mikro- dulkės	96,06	0,20	0,05	0,25	0,42	1,21	0,11	0,74
Dolomito dulkės	2,88	1,60	1,11	31,43	19,14	–	–	34,50
Karbonatinė opoka	64,4	4,1	2,4	31,5	0,9	–	–	–

Kaip mineralinis priedas tyrimams buvo naudotas skystasis stiklas, vandeninis natrio silikato (NST–Na₂O·nSiO₂), kurio silikatinis modulis lygus

3,3, o sauso $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ ir vandens santykis sudarė 60:40, vidutinė tirpalo tankio vertė – 1382 kg/m^3 .

2.1.3. Cheminės įmaišos

Tyrimams naudotos technologinės betono įmaišos – plastiklis „FLUXER GT3“ ir orą įtraukianti įmaiša „Centrament Air 202“, atitinkančios LST EN 934-2 standarto reikalavimus. Superplastiklis „FLUXER GT3“ pagamintas modifikuoto naujos kartos polikarboksilato pagrindu, rekomenduojamas naudoti prekiniam betonui gaminti. Jis sumažina vandens kiekį analogiško slankumo betono mišinyje iki 40 % (2.8 lentelė).

Orą įtraukianti įmaiša „Centrament Air 202“ pagaminta sintetinių dervų pagrindu, naudojama betono atsparumui šalčiui padidinti. 2.9 lentelėje pateiktos orą įtraukiančios įmaišos savybės.

2.8 lentelė. Superplastiklio „FLUXER GT3“ techniniai duomenys ir savybės

Table 2.8. Technical characteristics and properties of superplasticizer “FLUXER GT3”

Savybės	Vertė
Dozavimas (maksimalus), %	1,5
Vandens sumažinimas, %	iki 40
Tirpalo tankis, kg/m^3	1035
Tirpalo pH	5
Aktyvaus komponento koncentracija, %	36

2.9 lentelė. Orą įtraukiančios įmaišos „Centrament Air 202“ techniniai duomenys ir savybės

Table 2.9. Technical characteristics and properties of air entraining admixture “Centrament Air 202”

Savybės	Vertė
Tirpalo tankis, kg/m^3	~1000
Rekomenduojama dozė, g	2–15
Maksimalus chlorido kiekis, % masės dalis	<0,10
Maksimalus šarmų kiekis, % masės dalis	<0,5

2.1.4. Užpildai

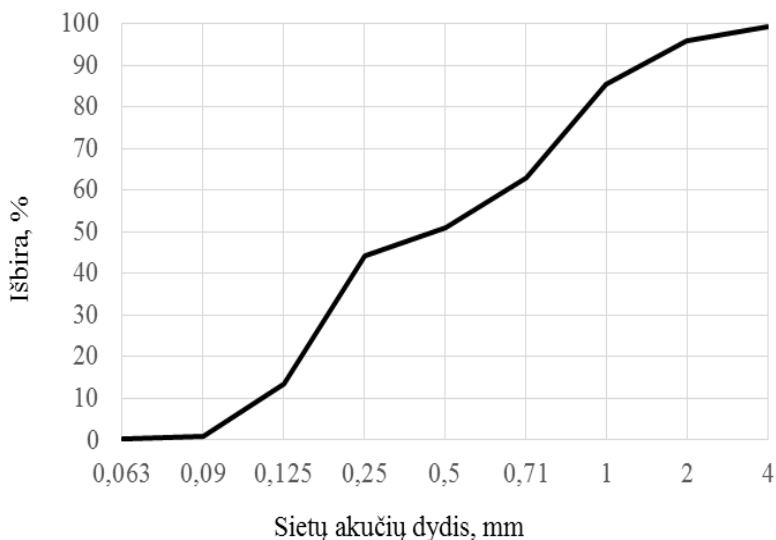
Kaip smulkusis užpildas betonui buvo pasirinktas 0/4 frakcijos smėlis. Smėlis atitinka LST EN 12620:2003+A1:2008 standarto reikalavimus. Smėlio fizikinių savybių tyrimo duomenys, cheminė smėlio sudėtis bei granulimetrinė sudėtis pateikti 2.10, 2.11 lentelėse ir 2.1 paveiksle.

2.10 lentelė. Smėlio fr. 0/4 fizikinės savybės**Table 2.10.** Physical properties of sand fr. 0/4

Savybės	Vertė
Granulimetrinė sudėtis	G _r 85
Dalelių tankis, kg/m ³	2679
Piltinis tankis, kg/m ³	1654
Vandens įmirkis, %	0,2%

2.11 lentelė. Cheminė smėlio fr. 0/4 sudėtis**Table 2.11.** The chemical composition of the sand fr. 0/4

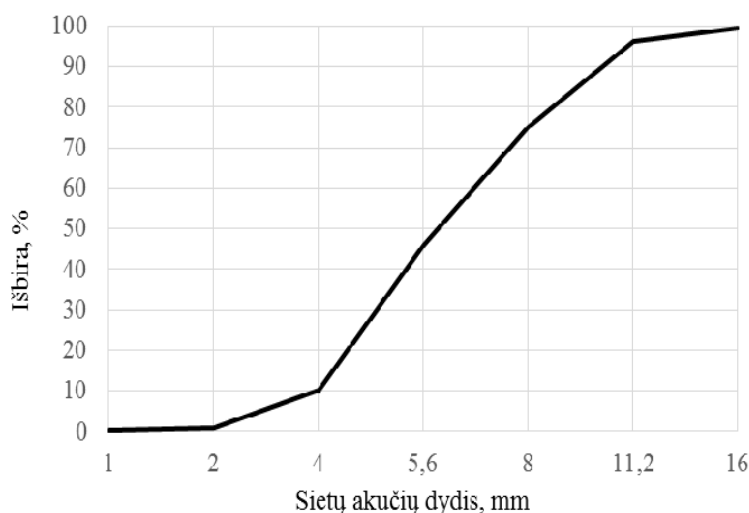
SiO ₂ , %	Al ₂ O ₃ , %	Fe ₂ O ₃ , %	CaO, %	MgO, %	R ₂ O, %
94,77	2,74	0,27	0,25	0,14	1,18

**2.1 pav.** Smėlio fr. 0/4 granulimetrinė sudėtis**Fig. 2.1.** The granulometric composition of sand fr. 0/4

Žvirgždas, atitinkantis LST EN 12620:2003+A1:2008 standarto reikalavimus, buvo naudojamas betono gamybai. Žvirgždo fizikinių savybių tyrimo duomenys ir granulimetrinė sudėtis pateikti 2.12 lentelėje ir 2.2 paveiksle. Žvirgždo mineralinė-petrografinė sudėtis: granitas – 29,4 %, dioritas – 2,3 %, gabras – 2,0 %, porfyras – 1,9 %, kvarcas – 3,0 %, lauko špatai – 1,2 %, pilkasis smiltainis – 1,5 %, klintis – 32,7 %, dolomitas – 26,0 %.

2.12 lentelė. Žvirgždo fr. 4/16 fizikinės ir cheminės savybės**Table 2.12.** The physical and chemical properties of gravel fr. 4/16

Savybės	Vidutinė vertė
Granulimetrinė sudėtis	G _f 90/15
Dalelių tankis, kg/m ³	2670
Piltnis tankis, kg/m ³	1597
Vandens įmirkis, %	1,30
Chloridų kiekis, %	≤ 0,01
Rūgštyje tirpių sulfatų kiekis, %	≤ 0,2
Bendras sieros kiekis, %	≤ 1

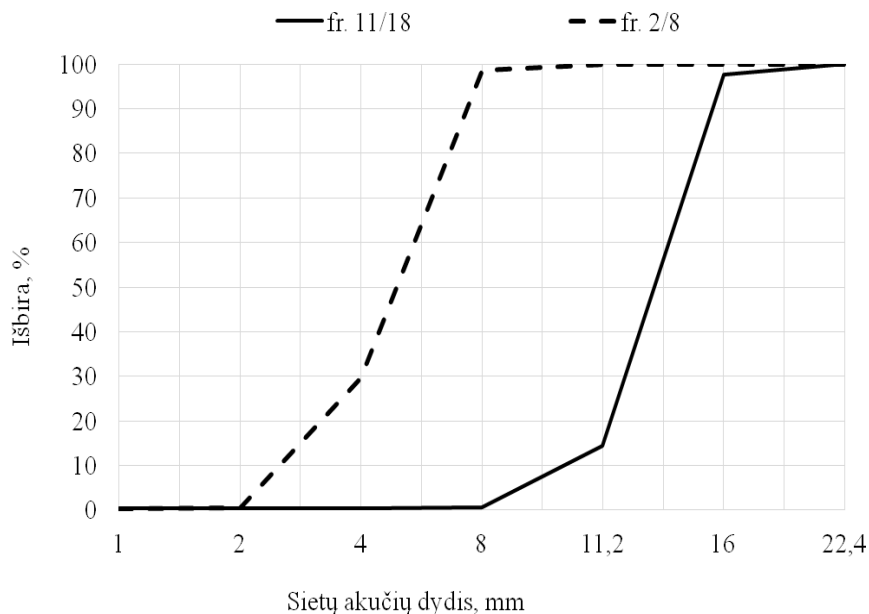
**2.2 pav.** Žvirgždo fr. 4/16 granulimetrinė sudėtis**Fig. 2.2.** The granulometric composition of gravel fr. 4/16

Granitinės skaldos, atitinkančios LST EN 12620:2003+A1:2008 standarto reikalavimus, frakcijos 2/8 ir 11/16 buvo naudojamos betono gamybai. 2.13 lentelėje pateiktos granitinės skaldos fizikinės ir mechaninės savybės, o 2.3 paveiksle – granitinės skaldos dviejų frakcijų 2/8 ir 11/16 granulimetrinė sudėtis.

Granito mineralinė-petrografinė sudėtis: kvarcas – 23,4 %, feldšpatai – 54,7 % (pilkieji plagioklazai 45 % ir kalio feldšpatai 55 %), biotitas – 21,9 %.

2.13 lentelė. Granito skaldos frakcijų 2/8 ir 11/16 fizikinės ir mechaninės savybės**Table 2.13.** The physical and mechanical properties of crushed granite fr. 2/8 and 11/16

Medžiagos	Frakcija	Vidutinė vertė	Frakcija	Vidutinė vertė
Granulimetrinė sudėtis	2/8	G _c 90/10	11/16	G _c 95/10
Dalelių tankis, kg/m ³	2/8	2750	11/16	2750
Piltinis tankis, kg/m ³	2/8	1335	11/16	1410
Atsparumas dėvėjimuisi, masės %	2/8	11,90	11/16	5,60
Atsparumas smūgiams, masės %	2/8	16,00	11/16	18,00
Atsparumas atšaldymui ir atšildymui, %	2/8	0,49	11/16	0,60
Vandens įmirkis, %	2/8	0,43	11/16	0,42

**2.3 pav.** Granitinės skaldos fr. 2/8 ir 11/16 granulimetrinė sudėtis**Fig. 2.3.** The granulometric composition of crushed granite fr. 2/8 and 11/16

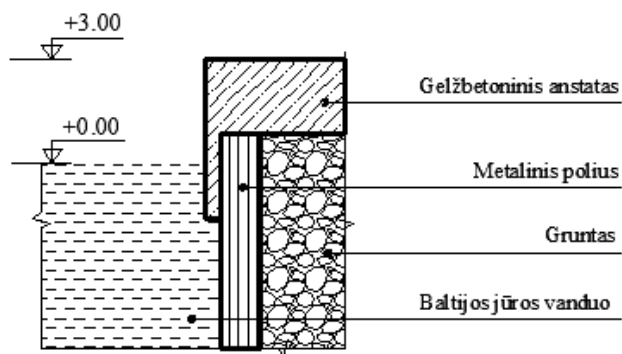
Hidrotechninio betono gamybai panaudotos smėlio 0/4 ir žvirgždo 4/16 frakcijos mišinys, arba smėlio 0/4 ir granito skaldos 2/8 ir 11/16 frakcijos mišinys.

2.2. Hidrotechninio betono konstrukcijų, eksploatuojamų Baltijos jūros aplinkoje, techninės būklės vertinimo metodika

Tyrimų metu buvo atliekamas Klaipėdos uosto hidrotechnikos statinių betoninių krantinių būklės tyrimas – vizualinis vertinimas. Vertinant hidrotechnikos statinių ir jų konstrukcijų bei medžiagų techninę būklę, atliekami vizualiniai stebėjimai bei tyrimai. Apžiūros būdu nustatomi hidrotechnikos statinių deformacijų dydžiai, bendra techninė hidrotechnikos statinių būklė, o kai kuriais atvejais papildomai taikyti laboratoriniai (eksperimentiniai) ar fizikiniai, cheminiai tyrimo metodai (STR 1.03.07:2017). Buvo vykdyta hidrotechnikos statinių ir jų konstrukcijų fotofiksacija. 2.4 paveiksle pateiktas hidrotechnikos statinio, eksploatuojamo Klaipėdos uoste, krantinės, kurios tyrimai buvo atliekami šiame darbe, pjūvis.

Vizualiniai krantinių tyrimai atlikti norint išsiaiškinti hidrotechninio betono irimo priežastis. Išnagrinėti krantinių rekonstrukcijos techniniai darbo projektai, krantinių techniniai pasai ir nustatyta, kad naudoto betono stiprumo markė yra M450 (klasė B35), stipris siekė 45,8 MPa (458 kg/cm²), betono mišiniui gaminti naudotas portlandcementis PC500 (CEM I 42,5), kelių frakcijų granitinės skaldos ir smėlio užpildai. Naudotų cheminių įmaišų pavadinimai dokumentuose neskelbiami.

Apžiūrėtos Klaipėdos jūrų uosto krantinės, kurių viršutinė dalis pastatyta iš hidrotechninio betono. Tai gelžbetoninės konstrukcijos, kurios neatlieka laikančiosios funkcijos, bet yra pritvirtintos prie krantinės metalinių konstrukcijų ir veikiamos atmosferinių poveikių – Baltijos jūros aplinkos poveikių (2.4 pav.).



2.4 pav. Hidrotechnikos statinių gelžbetoninių konstrukcijų pjūvis

Fig. 2.4. Section of reinforced concrete constructions of hydrotechnical structures

Apžiūrėtoms hidrotechnikos konstrukcijoms eksploatuojamoms Klaipėdos uoste yra keliamas pagrindinis reikalavimas – ilgaamžiškumas. Hidrotechninio betono ilgaamžiškumą galime apibrėžti kaip gebėjimą išlaikyti nepakitusias fizikines, mechanines ir chemines savybes eksploatacijos metu (Merida, Kharchi 2015). Klaipėdos uosto hidrotechnikos statinių betoninių krantinių būklės vizualinis vertinimas buvo atliekamas nuo kranto arba plaukiant laivu, fotografuojant esamą betono techninę būklę fotoaparatu „Canon EOS M3“ skirtingomis oro sąlygomis.

2.3. Baltijos jūros vandens cheminės sudėties ir druskų kiekio betone nustatymo metodika

Atlikus Klaipėdos uosto hidrotechnikos statinių vizualinę apžiūrą tiksliai hidrotechninio betono įvertinimui, atlikta Baltijos jūros vandens cheminė analizė tam tikrose Klaipėdos jūrų uosto akvatorijos vietose – šiaurinėje Klaipėdos uosto akvatorijos dalyje (T1), Danės upės ir Klaipėdos uosto akvatorijos susikirtimo vietoje (T2) ir centrinėje Klaipėdos jūrų uosto akvatorijos dalyje (T3). Taip pat buvo atlikti hidrotechninio betono, ilgą laiką naudoto BJA (taške T3) ir Danės upės vandenyje (taške T2), cheminė analizė. Atlikti Baltijos jūros vandens ir jame naudoto betono cheminiai tyrimai (titrimetrinės analizės ir chromatografijos metodai) leido tiksliau įvertinti hidrotechninio betono naudojimo sąlygas jūros aplinkoje ir optimizuoti betonui, naudojamam jūros aplinkoje, taikomas žaliavas bei sudėtį.

Baltijos jūros vandens cheminis tyrimas atliktas pagal LST ISO 9297:2008 ir LST EN 1744-1:2003 standartų reikalavimus. Chloridų kiekis Baltijos jūros vandenyje nustatytas titruojant sidabro nitratu ir naudojant chromato indikatorius (Moro metodas). Šis metodas apibūdinamas kaip titrimetrinės analizės metodas, kuriuo nustatytas Baltijos jūros vandenyje ištirpęs chloridas, nustatymo intervalas – nuo 5 mg/l iki 400 mg/l. Šio cheminės analizės metodo principas tas, kad chloridas reaguoja su pridėtais sidabro jonais, sudarydamas netirpų sidabro chloridą, kuris nusodinamas. Sidabro jonų perteklius sureaguoja su chromato jonais (indikatoriumi) ir išsiskiria raudonai rudos sidabro chromato nuosėdos. Sidabro nitratas pilamas tol, kol nustatomas ekvivalentinis taškas su sąlyga, kad terpės pH bus nuo 5 iki 9,5.

Baltijos jūros vandenyje esantys tirpūs sulfatai nustatyti sulfatus nusodinant virimo temperatūroje bario chlorido tirpalu, kai pH intervalas buvo nuo 1 iki 1,5. Po nusodinimo atlikta gravimetrinė analizė.

Ištirpusių Na^+ , K^+ , Mg^{2+} jonų Baltijos jūros vandenyje cheminis tyrimas atliktas pagal LST EN ISO 14911 jonų mainų chromatografijos metodu. Naudotas chromatografas – HPLC sistema su fluorescenciniu detektoriumi, automatinis mėginių ėmikliu. Gauti Baltijos jūros vandens cheminių tyrimų rezultatai pateikti 3 skyriuje.

Hidrotechninio betono, naudoto BJA, cheminiai tyrimai atlikti pagal standartą LST EN 1744-1. Hidrotechninio betono bandiniai buvo paimti taškuose T2 ir T3 (3.8 pav.): T2 – taške iš Danės upės krantinės, T3 – taške iš Klaipėdos uosto akvatorijoje eksploatuojamos krantinės hidrotechninio betono. Apie 10 cm skersmens kernai buvo pjaunami naudojant kernų pjovimo įrangą. Paimti hidrotechninio betono bandiniai – kernai – buvo paruošti bandymams laboratorijoje. Po 100 g hidrotechninio betono buvo susmulkinta iki miltelių porcelianinėje grūstuvėje. Viena litre vandens ekstrahuoti betono milteliai buvo laikomi vieną parą ir toliau buvo nustatomas druskų kiekis ekstrakto. Betono cheminė analizė atlikta pagal standartų LST EN 1744-1, LST ISO 9297:2008 ir LST EN ISO 14911 reikalavimus. Chloridų ir sulfatų kiekiai nustatomi pagal pirmiau aprašytas metodikas taip pat kaip ir atliekant jūros vandens bandymus.

2.4. Cemento tešlos, betono mišinio ruošimo, bandinių formavimo metodikos

Cemento tešloms ir hidrotechninio betono mišiniams paruošti buvo naudojami sausi užpildai. Cementas ir užpildai bei cheminės įmaišos buvo dozuojami pagal masę, o vanduo – pagal tūrį. Plastiklis buvo įmaišomas į mišinius kartu su vandeniu, kuris buvo naudojamas cemento tešloms ar hidrotechninio betono mišiniams ruošti, o orą įtraukianti įmaiša buvo dozuojama maišant betono mišinius, sudozavus visą vandens kiekį.

Atliekant modifikuotų cemento tešlų tyrimus aktyviais mineraliniais priedais – aukštakrosnių šlaku, lakiaisiais pelenais, SiO_2 mikrodulkėmis, dolomito dulkėmis, skystuoju stiklu, opoka, buvo keičiama nuo 5 iki 10 % cemento masės. 2.14 lentelėje pateikiamos tyrimams naudotų cemento tešlų sudėtys, esant pastoviam V/C santykiui, lygiam 0,27.

Cemento tešlos mišiniai buvo maišomi standartinėje priverstinio maišymo maišyklėje naudojant sausąsias medžiagas pagal LST EN 196-1 standarte pateiktą metodiką. Maišymo trukmė – 90 s. Bandiniams suformuoti buvo naudojamos vandeniui nelaidžios ir drėgmę neįgeriančios metalinės formos. Cemento akmens bandiniai buvo formuojami prizmės $40 \times 40 \times 160$ mm formose ir kietinami 28 paras 20 ± 2 °C temperatūroje vandenyje kietinimo kameroje.

Betono mišiniai buvo maišomi priverstinio maišymo laboratorinėje maišyklėje, kurios talpa – 70 l, naudojant sausąsias medžiagas. Pradžioje buvo dozuojami susi užpildai ir cementas bei mineralinis priedas, jeigu naudojamas. Sausas mišinys maišytas 30 sekundžių. Toliau dozuojamas vanduo kartu su plastifikuojančiu priedu ir mineralinio priedo suspensija, jeigu jis naudojamas, maišoma 30 sekundžių. Taip pat dozuojama orą įtraukianti įmaiša ir maišoma

120 sekundžių. Hidrotechninio betono mišinio slankumas buvo nustatomas pagal standarte LST EN 12350-2:2009 pateiktą metodiką, oro kiekis – pagal LST EN 12350-7 pateiktą metodiką, betono mišinio tankis – pagal LST EN 12350-6 pateiktą metodiką.

2.14 lentelė. Tyrimams naudotų cemento tešlų sudėtys

Table 2.14. Composition of tested cement pastes

Mišinio žymuo	Cemento kiekis, %					Mineralinis priedas, %				Plastiklis, %
	CEM I 42,5 N	CEM I 42,5 R	CEM III 32,5 B	CEM II A/S - 42,5 N	CEM II A/ LL -42,5 N	Karbonatinė opoka	SiO ₂ mikro- dulikės (suspensija)	Dolomito dulės	Skystasis stiklas	
C1	95						5			0,5
C2				95			5			0,5
C3					95		5			0,5
C4	90							10		0,5
C5	95								5	0,5
C6		95					5			0,5
C7		90				10				0,5
C8		95							5	0,5
C9			95				5			0,5

Išbandytos trys hidrotechninio betono mišinio sudėtys, pateiktos 2.15 lentelėje, su skirtingais cementų tipais. Jos skiriasi mineraliniu priedo kiekiu procentais ir vandens kiekiu, išlaikant vienodą slankumo rodiklį. Visuose mišiniuose buvo naudojamas plastiklis, jo dėta 0,8 % nuo cemento masės. Įterpiant į hidrotechninio betono mišinius superplastiklį, buvo siekiama pagerinti betono mišinio technologines savybes. Kaip stambusis užpildas buvo naudota dviejų frakcijų – 2/8 ir 11/16 – granitinė skalda. Smulkiuoju užpildu buvo panaudotas 0/4 frakcijos smėlis. Taip pat, siekiant padidinti hidrotechninio betono atsparumą šalčiui, naudota orą įtraukianti cheminė įmaiša.

Hidrotechninio betono, modifikuoto granuliuto aukštakrosnių šlako ir klinties priedais, tyrimams atlikti suformuoti šeši hidrotechninio betono mišiniai, kurių sudėtys pateiktos 2.16 lentelėje. Hidrotechninio betono bandiniai buvo formuojami su skirtingų tipų cementais, keičiant jų kiekius ir gaunant skirtingus granuliuto aukštakrosnių šlako kiekius betone. Toks kelių tipų cementų naudojimas gaminant betonus rekomenduojamas kitų autorių ir praktinėse rekomendacijose (Nagrockienė *et al.* 2013, Norvegijos statybiniai reglamentai, rekomendacijos).

2.15 lentelė. Cemento tipo įtakos tyrimams naudoto hidrotechninio betono sudėtys
Table 2.15. Hydrotechnical concrete compositions for the influence of cement type research

Medžiagos	Mišinio žymėjimas		
	BC1	BC2	BC3
Aukštakrosnių šlakas, %	0	17	70
Cemento tipas	CEM I 42,5 N(MA)	CEM II A/S 42,5N	CEM III/B 32,5 N-H(SR)
Cementas, kg	433	433	433
Granitinė skalda 2/8, kg	411	411	411
Granitinė skalda 11/16, kg	615	615	615
Smėlis 0/4, kg	754	754	754
Vanduo, l	120	130	147
Plastifikuojanti įmaiša, kg	3,5	3,5	3,5
Orą įtraukianti įmaiša, kg	0,09	0,09	0,09
V/C	0,28	0,36	1,13
V/R	0,28	0,30	0,34

2.16 lentelė. Granuliuoto aukštakrosnių šlako ir klinties priedų įtakos tyrimams naudoto hidrotechninio betono sudėtys

Table 2.16. Hydrotechnical concrete compositions for the influence of blast furnace slag and limestone additives research

Medžiagos	Mišinio žymėjimas					
	BS0	BS1	BS2	BS3	BS4	BL1
Aukštakrosnių šlako (klienties*) priedas, %	0	17	35	49	70	17*
CEM I 42,5 N, kg	433	–	216	129	–	–
CEM II A/S 42,5 N, kg	–	433	–	–	–	–
CEM III/B 32,5 N-H(SR), kg	–	–	216	303	433	–
CEM II A/LL 42,5 N, kg	–	–	–	–	–	433
Granitinė skalda fr. 2/8, kg	411	411	411	411	411	411
Granitinė skalda fr. 11/16, kg	615	615	615	615	615	615
Smėlis fr. 0/4, kg	754	754	754	754	754	754
Vanduo, l	142	142	142	142	142	142
Plastifikuojanti įmaiša, kg	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
Orą įtraukianti įmaiša, kg	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26
V/C	0,33	0,40	0,51	0,64	1,09	0,40
V/R	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33

Hidrotechninio betono, modifikuoto akmens anglies deginimo pelenais, tyrimams atlikti suformuoti 5 hidrotechninio betono mišiniai, kurių sudėtys pateiktos 2.17 lentelėje.

2.17 lentelė. Akmens anglies deginimo pelenų priedo įtakos tyrimams naudoto hidrotechninio betono sudėtys

Table 2.17. Hydrotechnical concrete compositions for the influence of coal fly ash additive research

Medžiagos	Mišinio žymėjimas				
	BV0	BV1	BV2	BV3	BV4
Lakiųjų pelenų priedas, %	0	17	35	49	70
Cementas CEM I 42,5 N, kg	433	359	281	221	131
Lakieji pelenai, kg	0	74	152	212	303
Granitinė skalda fr. 2/8, kg	411	411	411	411	411
Granitinė skalda fr. 11/16, kg	615	615	615	615	615
Smėlis fr. 0/4, kg	754	754	754	754	754
Vanduo, l	142	142	142	142	142
Plastifikuojanti įmaiša, kg	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
Orą įtraukianti įmaiša, kg	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26
V/C	0,33	0,40	0,51	0,64	1,09
V/R	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33

Hidrotechninio betono mišinių, modifikuotų SiO_2 mikrodulkėmis, tyrimams atlikti suformuoti penki hidrotechninio betono mišiniai, kurių sudėtys pateiktos 2.18 lentelėje. Šie hidrotechninio betono mišiniai buvo formuojami su vieno tipo cementu CEM I 42,5 N, 17 % akmens anglies pelenų priedu ir papildomai pakeičiant 0 %, 2 %, 4 %, 6 % ir 7 % cemento kiekio SiO_2 mikrodulkių priedu.

2.18 lentelė. SiO_2 mikrodulkių priedo įtakos tyrimams naudoto hidrotechninio betono sudėtys

Table 2.18. Hydrotechnical concrete compositions for the influence of silica fume (SiO_2) additive research

Medžiagos	Mišinio žymėjimas				
	BVSi0	BVSi1	BVSi3	BVSi4	BVSi5
SiO_2 mikrodulkių priedas, %	0	2	4	6	7
Cementas CEM I 42,5 N, kg	359	352	345	338	334
Lakiųjų pelenų priedas, %	17	17	17	17	17
Lakiųjų pelenų priedas, kg	74	74	74	74	74
SiO_2 mikrodulkės, kg	0	9	17	26	35

2.18 lentelės pabaiga

Medžiagos	BVSi0	BVSi1	BVSi3	BVSi4	BVSi5
Granitinė skalda fr. 2/8, kg	411	411	411	411	411
Granitinė skalda fr. 11/16, kg	615	615	615	615	615
Smėlis fr. 0/4, kg	754	754	754	754	754
Vanduo, l	142	142	142	142	142
Plastifikuojanti įmaiša, kg	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
Orą įtraukianti įmaiša, kg	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26
V/C	0,40	0,40	0,41	0,42	0,43
V/R	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33

Stambiojo užpildo mineralinės sudėties (stambusis žvirgždo ir skaldos užpildas, granito skaldos užpildas) įtakos betono atsparumui jūros aplinkos poveikiui tyrimams buvo suformuoti betono bandiniai su skirtingu žvirgždo skaldos užpildo, pakeičiančio granitinės skaldos užpildą, kiekiu: 0 %, 25 %, 50 % ir 75 %. 2.19 lentelėje pateiktos minėtų betono mišinių sudėtys.

2.19 lentelė. Stambiojo užpildo mineralinės sudėties įtakos tyrimams naudoto hidrotechninio betono sudėtys

Table 2.19. Hydrotechnical concrete compositions for the influence of coarse aggregate mineral composition research

Medžiagos	Mišinio žymėjimas			
	BZ0	BZ1	BZ2	BZ3
Žvirgždo skaldos kiekis, %	0	25	50	75
Cementas CEM I 42,5 N, kg	435	435	435	435
Granitinė skalda fr. 2/8, kg	438	328	219	110
Granitinė skalda fr. 11/16, kg	657	493	329	164
Žvirgždo skalda fr. 4/16, kg	–	274	547	821
Smėlis fr. 0/4, kg	677	677	677	677
Vanduo, l	161	161	161	161
Orą įtraukianti įmaiša, kg	0,26	0,26	0,26	0,26
V/C	0,37	0,37	0,37	0,37
V/R	0,37	0,37	0,37	0,37

Norint nustatyti šaldymo terpės įtaką betono atsparumo jūros aplinkos poveikiui bandymo rezultatams, atliktas tyrimas su skirtingomis šaldymo terpėmis išbandyti du hidrotechninio betono mišiniai, kurių sudėtys pateiktos 2.20 lentelėje. Bandyti du hidrotechninio betono mišiniai su skirtingais dviejų

tipų cementais – su 17 % aukštakrosnių šlako priedu ir neturinčiu mineralinio priedo.

2.20 lentelė. Šaldymo terpės įtakos ilgaamžiškumo bandymų rezultatams naudotų betono mišinių sudėtys

Table 2.20. Composition of concrete mixtures for the influence of freezing media on the results of durability reseach

Medžiagos	Mišinio žymėjimas	
	BM1	BM2
Aukštakrosnių šlako priedas, %	0	17
Cementas CEM I 42,5 N, kg	320	–
Cementas CEM II A/S 42,5 N, kg	–	320
Granitinė skalda fr. 2/8, kg	311	311
Granitinė skalda fr. 11/16, kg	715	715
Smėlis fr. 0/4, kg	889	889
Vanduo, l	165	165
Plastifikuojanti įmaiša, kg	3,5	3,5
Orą įtraukianti įmaiša, kg	0,128	0,128
V/C	0,52	0,62
V/R	0,52	0,52

Visose betono mišinių sudėtyse pateikiami medžiagų kiekiai vienam m³ betono mišinio.

2.5. Betono bandymų metodikos

2.5.1. Betono fizikinių savybių ir stiprumo bandymo metodikos

Betono bandiniai buvo kietinami 20 ± 2 °C temperatūros vandenyje kietinimo kameroje. Po 7 ir (arba) 28 parų kietinimo buvo nustatomas betono tankis, gniuždymo stipris, sorbeinės savybės, atsparumas BJA poveikiui ir chloridų difuzijos koeficientas.

Sukietėjusio betono tankis nustatomas pagal LST EN 12350-6, o gniuždymo stipris – pagal standartą LST EN 12390-3. Bandinių gniuždymo stipriui nustatyti apkrovos didinimo greitis buvo palaikomas $0,6 \pm 0,2$ MPa/s.

Iš eksploatuotų hidrotechnikos statinių išgręžti kernai buvo paruošti bandymams nupjovus ir nušlifavus jų viršutinį ir apatinį paviršius (2.5 pav.). Hidrotechninio betono kernų tankis buvo nustatytas pagal standarto LST EN 12350-6 reikalavimus, o gniuždymo stipris – pagal standarto LST EN 12390-3 reikalavimus.

Betono gniuždymui bandyti buvo naudotas „Toni Technik“ gniuždymo stiprio ir deformacijų matavimo įranga, pavaizduota 2.6 paveiksle ir gniuždymo stiprio bandymo įranga „P-125/M“, atitinkanti standarto LST EN 12390-2 reikalavimus.



2.5 pav. Hidrotechninio betono, naudoto Baltijos jūros aplinkoje, bandiniai (kernai) ir išorinė kernų dalis, naudota druskų kiekiui betone nustatyti

Fig. 2.5. Specimens (cores) and external side of cores for sulfs content in concrete testing of hydrotechnical concrete after exploitation in Baltic sea environment

2.6 paveiksle pateikta betono kernų bandymo įranga, naudojant specialų gniuždymo apkrovos rėmą su papildomomis apspaudimo plokštėmis ir deformacijų matavimų įranga.



2.6 pav. Hidrotechninio betono, naudoto Baltijos jūros aplinkoje, gniuždymo stiprio ir deformacijų nustatymo įranga

Fig. 2.6. Equipment for testing of compressive strength and deformations of hydrotechnical concrete after exploitation in Baltic sea environment

2.5.2. Ultragarso sklidimo greičio cemento akmenyje matavimas

Ultragarso impulso sklidimo laikas nustatytas prietaisu „Pundit 7“ (keitiklių dažnis 54 kHz), cemento akmenį 7 paras kietinus vandenyje. Ultragarso tyrime buvo taikytas impulsinis ultragarsinių bangų sklidimo trukmės matavimo metodas, pagrįstas priekinio trumpo impulso sklidimo elektroniniu modeliavimu, kai impulsas nueina kelią tarp dviejų keitiklių, išdėstytų tam tikru atstumu. Generatoriaus siunčiami ultragarsiniai impulsai keitiklyje virsta mechaniniais ir tampriosiomis bangomis, kurios sklinda tiriamąja medžiaga. Priėmimo keitiklis mechaninį impulsą, perėjusį per medžiagą, paverčia elektriniu ir atvaizduoja ekrane. Ultragarso bangų sklidimo greitis, cemento akmenį 7 paras kietinus vandenyje, apskaičiuotas pagal (2.1) formulę:

$$V_{UIG} = \frac{l}{1000 \times t}, \quad (2.1)$$

čia V_{UIG} – ultragarso bangų sklidimo greitis, km/s; l – bandinio ilgis, m; t – signalo sklidimo trukmė, s

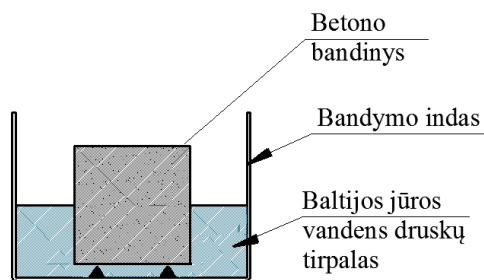
Ultragarso impulso sklidimo greitis rodo cemento akmenyje vykstančių struktūros formavimosi procesų eigą ir galimų destruktinių reiškinių (mikroplyšių) atsiradimo procesus.

2.5.3. Betono sorbcijos procesų bandymo metodika

Betono sorbcijos ir desorbcijos parametrai nustatyti pritaikius vandens įgėrio kinetikos tyrimo principus, matuojant betoninio bandinio masės didėjimą per tam tikrą laiką (Skripkiūnas 1997).

Sorbcijos metodikos esmė yra cemento akmens kapiliarinio poringumo matavimas bei betono ilgaamžiškumo prognozavimas pagal sorbcijos parametrus. Sorbcijos parametrams nustatyti naudojami trys bandiniai, kurie išdžiovinami iki pastovios masės, pasveriami, pamerkami į vandenį iki pusės (2.7 pav.) ir sveriami ore nuvalius jų paviršių drėgnu audeklu po 15 min, 30 min, 45 min, 1 h, 2 h, 4 h, 8h, 24 h, 48 h ir 168 h mirkymo.

Cemento akmens bandymui buvo paimta po tris 40×40×160 mm dydžio cementinio akmens prizmelių bandinius. Bandant cemento akmens atsparumą Baltijos jūros aplinkos poveikiui, bandiniai buvo merkami į Baltijos jūros vandens cheminę sudėtį atitinkantį druskų tirpalą. Cemento akmens bandiniai (prizmelės) buvo įmerkiami iki pusės į Baltijos jūros vandens cheminę sudėtį atitinkantį druskų tirpalą ir mirkyti 2 mėn. Po 2 mėn. išimti, apžiūrėti, atlikta fotofiksacija.



2.7 pav. Betono sorbcijos bandymo schema

Fig. 2.7. Concrete sorption testing scheme

Hidrotechninio betono sorbcinių savybių nustatymui buvo bandoma po tris betono kubus $100 \times 100 \times 100$ mm dydžio. Betono kubai buvo perpjaunami pusiau. Sorbcijos bandymai buvo atlikti su orasausiais bandiniais, džiovinimo spintoje iki pastovios masės išdžiovintais bandiniais ir įmirkytais vandenyje iki pastovios masės bandiniais. Kiekvieno sorbcijos bandymo metu bandiniai buvo merkami į Baltijos jūros vandens cheminę sudėtį atitinkantį druskų tirpalą ir sveriami ore po 15 min, 30 min, 45 min, 60 min, 90 min, 120 min, 4 h, 8 h, 24 h, 48 h ir 168 h nuvalius bandinių paviršių drėgnu audėklu.

Iš gautų bandymo rezultatų apskaičiuotas kiekvieno betono bandinio Baltijos jūros vandens druskos tirpalo įgėris arba išdžiuvimas (sorbcijos arba desorbcijos dydis) W_a masės procentais pagal (2.2) formulę:

$$W_a = \frac{M_i - M_0}{M_0} \times 100\%, \quad (2.2)$$

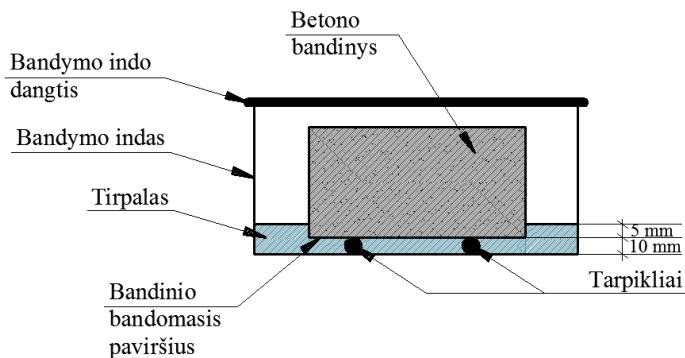
čia M_0 – pradinė bandinio masė, g; M_i – bandinio, mirkyto tam tikrą trukmę, masė, g.

2.5.4. Betono atsparumo Baltijos jūros aplinkos poveikiui bandymo metodika

Baltijos jūros aplinkoje (BJA) naudojamo hidrotechninio betono ilgaamžiškumo tyrimai buvo atliekami pagal metodiką, analogišką Europos techninėje specifikacijoje CEN/TS 12390-9 pateiktai atsparumo užšaldymui ir atšildymui bandymo CDF metodikai. Betono bandinių bandomasis paviršius įmerkiamas į druskos tirpalą, bandiniai veikiami užšaldymo ir atšildymo ciklais ir matuojami masės nuostoliai nuo bandomojo paviršiaus.

Iš hidrotechninio betono formuojami $100 \times 100 \times 100$ mm bandiniai, kurie po sukietėjimo buvo perpjaunami pusiau. Bandinių bandomasis paviršius yra metalinėje arba plastikinėje formoje suformuotas paviršius (neperpjautas

paviršius), kurio dydis – 100×100 mm. Bandomuoju paviršiumi žemyn bandiniai įmerkami 5 mm gyliu į druskų tirpalą, atitinkantį Baltijos jūros cheminę sudėtį, pastatant bandinius ant 5 ± 1 mm storio plastikinių tarpiklių (2.8 pav.)



2.8 pav. Hidrotechninio betono atsparumo Baltijos jūros aplinkos poveikiui bandymo schema

Fig. 2.8. Testing scheme of hydrotechnical concrete Baltic sea environment resistance

Bandant hidrotechninio betono bandinių atsparumą BJA poveikiui šaldomoji terpė buvo sudaryta iš Baltijos jūros vandens cheminę sudėtį atitinkančio druskų tirpalo. Tirpalo cheminė sudėtis pateikta 2.21 lentelėje.

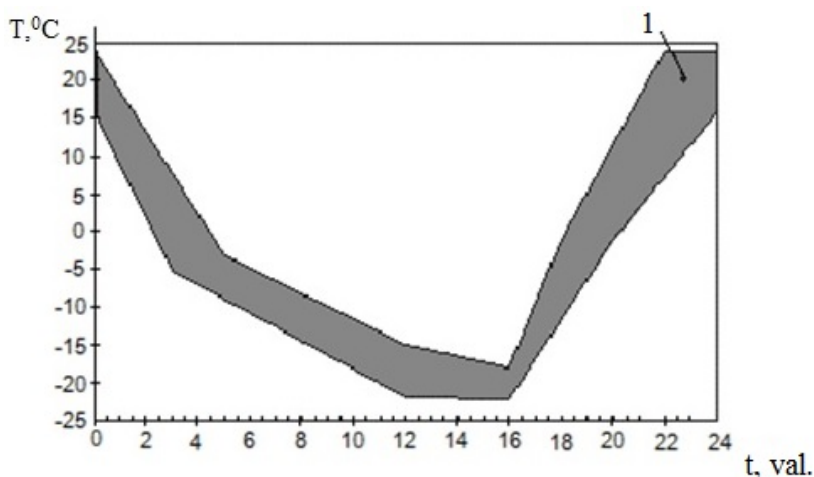
2.21 lentelė. Baltijos jūros vandens cheminę sudėtį atitinkančio druskų tirpalo sudėtis
Table 2.21. Chemical composition of saline solution corresponding to the Baltic sea water

Medžiaga	Medžiagos kiekis, mg/l
NaCl	1550
K ₂ SO ₄	700
MgSO ₄ · 7H ₂ O	20

Atliekant hidrotechninio betono atsparumo Baltijos jūros aplinkos poveikiui bandymą, buvo matuojami masės nuostoliai po 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 56 užšaldymo ir atšildymo ciklų, o atskirais atvejais – ir po 91 ar 112.

Bandymo pradžioje kapiliarinio įgėrio laikotarpiu bandymo indas su įdėtu betono bandiniu, užpylus šaldomosios terpės iki reikiamo lygio, uždengiamas dangčiu. Kapiliarinio įgėrio 20 ± 2 °C temperatūroje laikotarpis yra 7 paros. Po 7 parų indai su bandiniais dedami į šaldymo kamerą, kurioje palaikomas užšaldymo ir atšildymo režimas, pavaizduotas 2.9 paveiksle.

Po 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 56, 91 ir 112 užšaldymo ir atšildymo ciklų bandiniai buvo apžiūrėti, nufotografuoti. Po minėto užšaldymo ir atšildymo ciklų skaičiaus bandiniai išimami iš dėžučių. Bandinio bandomasis paviršius buvo nuvalomas su šepetėliu į plastikines dėžutes, kol nelieka ant bandomojo paviršiaus atskilusios medžiagos likučių. Atskilusios nuo bandomojo paviršiaus medžiagos dalelės buvo supilamos į popierinį filtrą. Surinktos atskilusios dalelės popieriniame filtre buvo džiovinamos 24 val. 40–60 °C temperatūroje. Išdžiovinus 0,1 g tikslumu nustatoma atskilusios sausos medžiagos masė.



2.9 pav. Hidrotechninio betono ilgaamžiškumo bandymo temperatūros pasiskirstymo laikui einant schema, 1– temperatūros šaldymo kameros aplinkoje intervalas

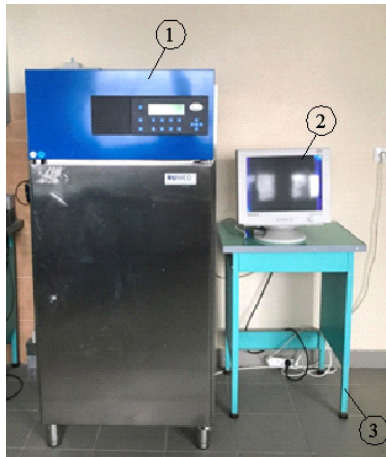
Fig. 2.9. Schematic of temperature distribution during time for durability test of hydrotechnical concrete, 1– temperature in the refrigerating room environment

Skaičiuojamas atskilusios medžiagos kiekis arba masės nuostoliai nuo bandomojo paviršiaus po 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 56, 91 ir 112 užšaldymo ir atšildymo ciklų pagal (2.3) formulę:

$$M = \frac{m_i}{0,01}, \quad (2.3)$$

čia M – masės nuostoliai nuo bandomojo paviršiaus, kg/m^2 ; m_i – atskilusios medžiagos nuo bandinio masė po i ciklų, g; 0,01 – bandomojo paviršiaus plotas, m^2 .

Betono atsparumo BJA poveikiui bandymui buvo naudojama programuojama šaldymo kamera anksčiau minėtam užšaldymo ir atšildymo režimui išlaikyti (2.10 pav. a) ir bandymo indai – plastikiniai indai su plastikiniu dangteliu, į kuriuos buvo talpinami betono bandiniai (2.10 pav., b).



2.10 pav. Hidrotechninio betono ilgaamžiškumo bandymo įranga:

1 – klimatinė kamera; 2 – kompiuteris; 3 – laboratorinis stalas

Fig. 2.10. Hydrotechnical concrete durability testing climatic chamber:

1 – climatic camera; 2 – computer; 3 – laboratory table

Eksperimentams buvo naudojami skirtingų šaldymo terpių tirpalai: distiliuotas vanduo, 3 % NaCl tirpalas, Baltijos jūros vandens cheminę sudėtį atitinkantis druskų tirpalas. Šaldymo terpė buvo pasirenkama norint reguliuoti bandomo betono irimo procesų greitį. 3 % NaCl druskos tirpalas naudojamas atliekant standartinius betono atsparumo šalčiui bandymus, o hidrotechninis jūros statinių betonas naudojamas Baltijos jūros vandenyje, todėl buvo atlikta Baltijos jūros vandens cheminė analizė ir jos rezultatai buvo panaudoti šaldymo terpės cheminei sudėčiai parinkti. Kontrolinei bandinių šaldymo terpei buvo pasirinktas distiliuotas vanduo.

2.5.5. Chloridų penetracijos betone bandymo metodika

Chloridų difuzija hidrotechniniame betone svarbi armatūros korozijos procesams vertinti. Koku būdu nustatyti ir vertinti chloridų migraciją betono kapiliarais, vieningos nuomonės mokslininkai nepateikia (Wunderlich 2005; Moskvinas *et al.* 1969). Tyrimuose buvo panaudotas NT BUILD-492 aprašytas chloridų difuzijos nustatymo metodas, kuris remiasi chloridų difuzijos skatinimu naudojant elektros srovės potencialą. Chloridų penetracijos bandymo esmė – prie ban-

dinio paviršiaus pridedami elektrodai, kurie sukelia chloridų jonų migraciją iš druskos tirpalo į betoną. Šis metodas yra pagrįstas Nernst ir Plancko lygtimi, darant prielaidą, kad hidrotechniniame betone, kuriame vyksta chloridų (esančių Baltijos jūros vandenyje) difuzija, yra homogeniška terpė. Difuzija vyksta, jei yra cheminis potencialas ar druskos koncentracijos gradientas, kurį sukelia elektros laukas, palaikomas elektros srovės potencialo. Difuzijos koeficientas išreikštas tokia matematine lygtimi:

$$D_{nssm} = \frac{0,0239(273 + T)L}{(U - 2)t} \times \left(x_d - 0,0238 \sqrt{\frac{(273 + T)Lx_d}{U - 2}} \right), \quad (2.4)$$

čia D_{nssm} – chloridų difuzijos koeficientas, $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$; U – įtampos vertė, V; T – anodinio tirpalo, pradinės ir galutinės temperatūros vidurkis, $^{\circ}\text{C}$; L – bandinio storis, mm; x_d – chloridų penetracijos gylis betone, mm; t – bandymo trukmė, h.

Tyrimui iš hidrotechninio betono buvo suformuoti betono kubai ($100 \times 100 \times 100 \text{ mm}$), kurie buvo perpjauti pusiau. Suformuoti bandiniai pirmą parą buvo laikomi formose ir uždengti plėvele, apsaugant juos nuo džiuvimo. Po 24 valandų bandiniai buvo išimami iš formų ir merkami į vandenį, kurio temperatūra $20 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Išlaikyti vandenyje 27 paras bandiniai buvo išimti iš vonelių, nusausinami ir bandomi.

Pagal standartinę chloridų penetracijos bandymų metodiką siūlomi bandyti cilindro formos bandinius. Mūsų atveju suformuoti hidrotechninio betono bandiniai buvo kubo formos, todėl buvo papildomai paruošti bandymui, apklijuojant šoninį jų paviršių gumine danga tirpalo nepralaidumui bandinio kraštinėse užtikrinti. Paruošti hidrotechninio betono bandiniai buvo vakuumuojami stikliniame eksikatoriuje, kaip pateikta 2.11 paveiksle.



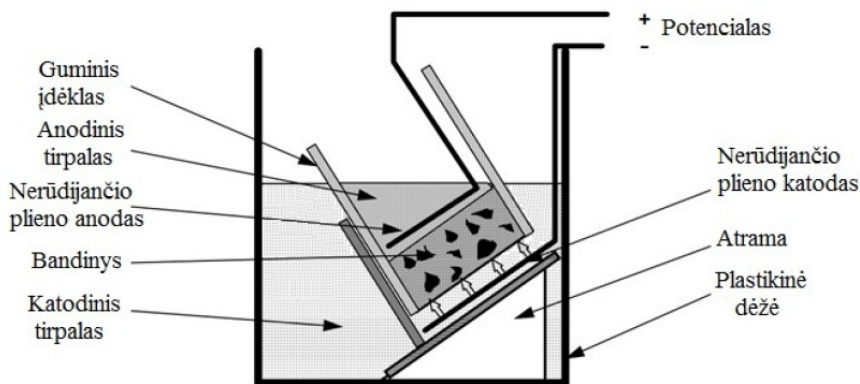
2.11 pav. Hidrotechninio betono bandinių vakuumavimas:

1 – bandiniai; 2 – bandymo indai

Fig. 2.11. Vacuuming process of hydrotechnical concrete samples:

1 – samples; 2 – test dish

Po vakuumavimo betono bandiniai buvo statomi ant pasvirusios atramos (2.12 pav.), kuri buvo plastikiniame rezervuare, į bandinio vidų užpilamas anodinis tirpalas, į plastikinę dėžę – katodinis. Katodinį tirpalą sudarė 10 % NaCl, t. y. 900 g distiliuoto vandens ir 100 g. NaCl, anodinį tirpalą – 12 g NaOH vienam litrai distiliuoto vandens. Paruošti tirpalai buvo laikomi laboratorijos patalpoje, kurioje oro temperatūra buvo nuo 20 iki 25 °C. Tuomet nerūdijančiojo plieno anodas buvo įstatomas į anodinį tirpalą, katodas – į katodinį tirpalą, kurie prijungiami prie elektros srovės šaltinio.

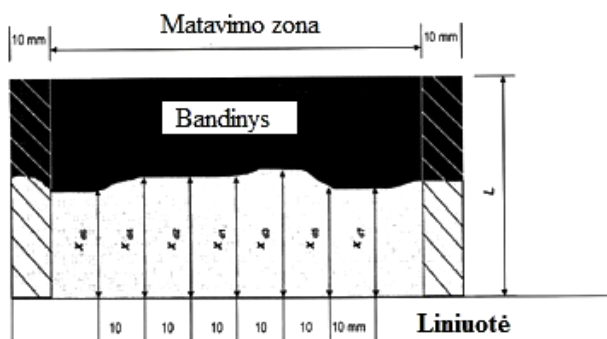


2.12 pav. Chloridų penetracijos hidrotechniniame betone bandymo schema
Fig. 2.12. Testing scheme for chloride penetration in hydrotechnical concrete

Prieš prijungiant prie elektros srovės šaltinio, pamatuojama katodinio tirpalo temperatūra ir užrašoma į rezultatų duomenų lapą. Įjungus elektros maitinimo prietaisą, buvo leidžiama elektros srovė, kuri prasiskverbėdavo per bandinio paviršių, neapsaugotą gumine danga. Elektros srovė elektros maitinimo prietaise kiekvieno bandymo atveju buvo reguliuojama pagal metodikoje pateiktą lentelę, suregulavus elektros srovę buvo užrašoma pradinė elektros srovės vertė. Taip pat pamatuojama ir užrašoma pradinė temperatūros vertė skirtinguose tirpaluose – katodiniame ir anodiniame. Taip betono bandinys buvo išlaikomas 48 h.

Po bandymo bandinys buvo skeliamas vertikalia kryptimi, perskeltas bandinio paviršius apipurškiamas sidabro nitrato druskos tirpalu. Chloridų penetracija hidrotechniniame betone nustatoma ant bandinio paviršiaus susiformavus kitai paviršiaus spalvai, brėžiant dviejų skirtingų spalvų susikirtimo liniją. Po linija pagal 2.13 paveiksle pateiktą schemą matuojamas pakeitusio spalvą sluoksnio storis ir skaičiuojamas chloridų įsiskverbimo gylio vidurkis į betoną. Bandymui naudoti šie reagentai ir medžiagos: distiliuotas vanduo, kalcio

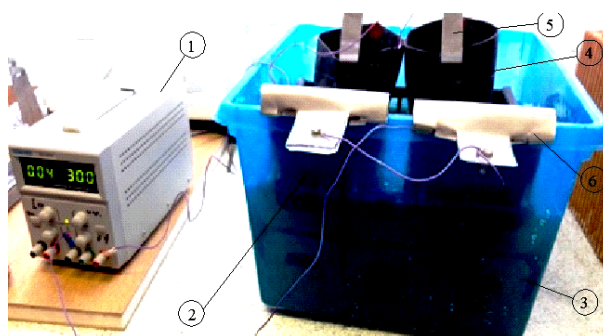
hidroksidas ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), natrio chloridas (NaCl), natrio hidroksidas ($\text{Na}(\text{OH})$), sidabro nitratas (AgNO_3).



2.13 pav. Chloridų penetracijos betone gylio matavimo schema

Fig. 2.13. Chloride penetration depth in concrete measurement scheme

Chloridų penetracijai hidrotechniniame betone buvo naudota bandymo įranga – rezervuaras katodiniam tirpalui (plastikinis indas $370 \times 270 \times 280$ mm), silikoninis tarpiklis, nerūdijančiojo plieno plokštelės elektrodams (1,05–2,0 mm pločio), bandinio laikiklis iš plastikinės dėžės, elektros galios maitinimo blokas, kuris gali tiekti pastovią elektros srovę nuo 0 iki 60 V, reguliuojamą įtampą 0,1 V tikslumu, ampermetras, matuojantis elektros srovę 0,1 mA tikslumu, termometras, matuojantis temperatūrą 0,1 °C tikslumu, 1 mm tikslumo liniuotė (2.14 pav.).



2.14 pav. Chloridų penetracijos betone matavimo įranga su betono bandiniais:

1 – elektros srovės įrenginys; 2 – bandymo indas; 3 – plastikinė dėžė;

4 – bandiniai; 5 – katodas; 6 – anodas

Fig. 2.14. Chloride penetration testing equipment with concrete samples:

1 – power supply unit; 2 – test dish; 3 – plastic box; 4 – samples;

5 – cathode; 6 – potential

Atliekant chloridų penetracijos betone bandymą vienu metu buvo naudoti dvi vieno bandinio dalys (betono kubas buvo perpjautas į dvi dalis). Katodinio tirpalo rezervuaras pripildomas 10 % NaCl tirpalu, jo išeigos kiekis – apie 11–12 l vienam bandymui. Bandymui buvo parinktas 48 valandų trunkantis elektros srovės poveikio eksperimento laikas. Po 48 valandų bandymo buvo matuojama temperatūra skirtinguose tirpaluose – katodiniame ir anodiniame. Lentelėje užrašoma galutinė elektros srovės reikšmė. Excel programa taikant Nernsto ir Planko lygtį (2.4 formulė) skaičiuojamas chloridų penetracijos koeficientas.

2.6. Antrojo skyriaus išvados

1. Klaipėdos uosto akvatorijoje eksploatuotų hidrotechnikos konstrukcijų techninė būklė turi būti vertinama vizualinės apžiūros būdu pagal konstrukcijos paviršiuje atsirandančius defektus ir ilgą laiką naudoto betono bandinių fizikinius ir mechaninius parametrus bei druskų kiekius bandiniuose.
2. Baltijos jūros vandens cheminė sudėtis ir druskų kiekiai, patenkantys į hidrotechninį betoną eksploatuojant Baltijos jūros aplinkoje, daro didelę įtaką hidrotechninio betono ilgaamžiškumui ir nustatomi standartiniais vandens cheminės analizės metodais.
3. Betono stiprumo ir deformacinių savybių bei druskų kiekio betone tyrimai po ilgos (daugiau nei 20 metų) naudojimo trukmės Baltijos jūros aplinkoje leidžia vertinti hidrotechninio betono naudojimo sąlygas.
4. Hidrotechninio betono atsparumą Baltijos jūros aplinkos poveikiui reikia vertinti sorbcijos ir desorbcijos, užšaldymo ir atšildymo, chloridų penetracijos bandymais, t. y. atlikti kompleksinį poveikių vertinimą.
5. Chloridų difuzija hidrotechniniame betone turi didelę įtaką armatūros korozijai, todėl jos nustatymas turi būti vienas iš hidrotechninio betono ilgaamžiškumo vertinimo rodiklių.
6. Hidrotechninio betono atsparumą Baltijos jūros aplinkos poveikiui galima vertinti pagal masės nuostolius po tam tikro skaičiaus užšaldymo ir atšildymo ciklų, kapiliariniu būdu įmirkius betono bandinius Baltijos jūros vandens cheminę sudėtį turinčiame druskų tirpale.

Modifikuoto hidrotechninio betono atsparumo jūros aplinkos poveikiui tyrimai

Šio skyriaus medžiaga paskelbta keturiuose moksliniuose straipsniuose (Lebedeva R., Skripkiūnas G., Kičaitė A., 2016; Lebedeva R. 2015, 2013, Lebedeva R., Skripkiūnas G., 2013) ir pristatyta penkiose mokslinėse konferencijose bei trijuose seminaruose.

Šių tyrimų tikslas – nustatyti hidrotechninio betono naudojimo sąlygas Klaipėdos jūrų uoste ir skirtingų mineralinių priedų įtaką hidrotechninio betono, naudojamo Baltijos jūros aplinkoje (BJA), ilgaamžiškumui. Šiame skyriuje aprašyti kompleksiniai skirtingų BJA poveikių hidrotechninio betono ilgaamžiškumui natūriniai ir eksperimentiniai tyrimai.

3.1. Baltijos jūros aplinkoje naudojamo hidrotechninio betono tyrimai

3.1.1. Hidrotechninio betono statinių pažaidų tyrimai

Klaipėdos uosto hidrotechnikos statiniai (krantinės, molai ir kt.) statomi iš hidrotechninio betono. Jie sudaro transporto sistemos infrastruktūros dalį, kuriai labai svarbus ilgaamžiškumo rodiklis. Įvairūs aplinkos parametrai ir eksploatacijos metu atsirandantys poveikiai daro didelę įtaką Klaipėdos uosto hidrotechnikos statiniams ir juos sudarančiam hidrotechniniam betonui (HTSB).

Baltijos jūros aplinkoje naudojamas hidrotechninis betonas turi atlaikyti visus poveikius, atsirandančius naudojant, ir neirti tiek visame tūryje (tūrinis irimas), tiek paviršiuje (paviršinis irimas). Baltijos jūros aplinkos klimato poveikiai sukelia išorinį betono paviršiaus irimą, o betono koroziniai procesai – tūrinį hidrotechninio betono irimą (Baženov 1987).

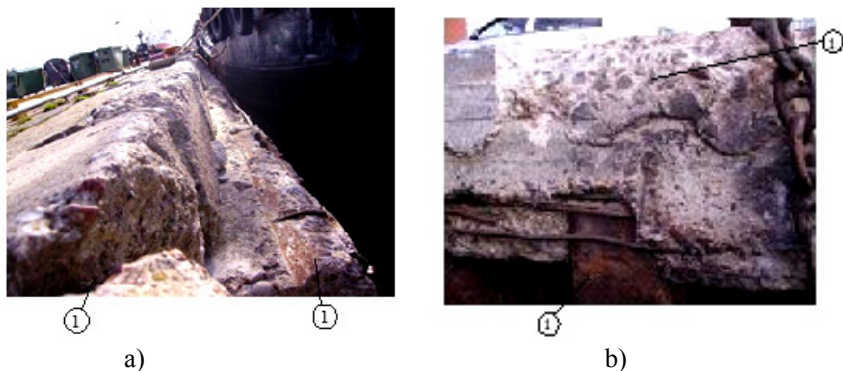
Klaipėdos uosto statinius veikia Baltijos jūros aplinkos poveikiai: vėjas, Baltijos jūros vanduo, oro temperatūros svyravimai, kritulių kiekis, saulės spinduliuotė, Baltijos jūros bangavimas, Baltijos jūros vandens srovės, Baltijos jūros vandens druskingumas ir kiti parametrai. Šie parametrai sukelia HTS betono paviršiaus irimą. 3.1 ir 3.7 paveiksluose pateikta Klaipėdos uosto HTS – krantinių – betono paviršiuje atsirandančių pažaidų atvejai.



3.1 pav. Hidrotechnikos konstrukcijų paviršiaus pažaidos:
1 – cemento akmens nutrupėjimas; 2 – armatūros korozija;
a) paviršiaus pažaidos; b) armatūros pažaidos

Fig. 3.1. Damages to the surface of hydrotechnical structures:
1 – crushing of cement stone; 2 – reinforcement corrosion;
b) cementitious stone felling, b) einforcement corrosion

Dažniausiai pastebimos pažaidos, atsirandančios hidrotechnikos konstrukcijose, eksploatuojamose Klaipėdos jūrų uoste – hidrotechninio betono paviršinio sluoksnio suirimas arba cementinio akmens nutrupėjimai iki stambiojo užpildo, armatūros apsauginio sluoksnio suirimas ir armatūros korozija (3.1 ir 3.2 pav.).



3.2 pav. Hidrotechnikos statinių pažaidos:

1 – cemento akmens nutrupėjimas; 2 – atviras užpildas;

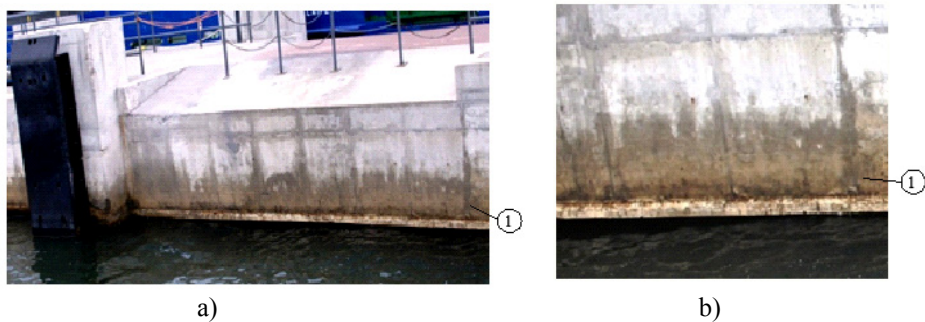
a) paviršinio betono sluoksnio suirimas;

b) armatūros apsauginio sluoksnio suirimas

Fig. 3.2. Damages to the surface hydrotechnical structures:

1 – crushing of cement stone; 2 – reinforcement corrosion;

a) destruction of surface concrete layer; b) open stuff



3.3 pav. Hidrotechnikos statinių pažaidos:

a) bendras hidrotechnikos statinio gelžbetoninės konstrukcijos kapiliarinis įgėris;

b) padidinta hidrotechnikos statinio gelžbetoninės konstrukcijos dalis,
kintamo vandens lygio zonoje, kapiliarinis įgėris

Fig. 3.3. Damages to the surface hydrotechnical structures:

a) overall structure view;

b) detail view in water level zone

Eksploatuojamose hidrotechnikos konstrukcijose pasireiškia kapiliarinis jūros vandens įgėris (3.3 pav. a ir 3.3 pav. b), kuris siekia keliasdešimt centimetrų, priklausomai nuo betono poringumo parametrų ir aplinkos sąlygų. Todėl naudojamas hidrotechninis betonas, esantis virš vandens lygio visą laiką yra sudrėkęs kapiliarinio įgėrio būdu ir gali būti veikiamas užšaldymo ir atšildymo ciklu, priklausomai nuo klimato sąlygų. Svarbus aplinkos poveikis naudojamam betonui yra ir temperatūra, nes temperatūros svyravimai sukelia betone tempimo ir gniuždymo įtempius, dėl kurių laikui bėgant betonas gali suirti (Skominas 2008).

G. Marčiukaitis mini betono paviršiaus struktūrinius ir konstrukcinius defektus, kurie atsiranda dėl netinkamo projektavimo ir technologinių reikalavimų neįvykdymo betonavimo darbų metu (Marčiukaitis 1985). Tokie betono struktūriniai ir konstrukciniai defektai pastebėti vizualinės Klaipėdos jūrų uosto hidrotechnikos konstrukcijų apžiūros metu. Defektai, betono paviršiuje atsiradę dėl technologinių betonavimo proceso pažaidų. Naudojamame hidrotechniniame betone šios pažaidos toliau didėja dėl anksčiau minėtų aplinkos poveikių ir mažina hidrotechninio betono ilgaamžiškumą.

Naudojant hidrotechninį betoną dėl paviršinio cemento akmens sluoksnio suirimo plonėja ar iš viso išnyksta apsauginis betono sluoksnis ir pasireiškia armatūros korozija. 3.4 paveiksle parodytos Baltijos jūros aplinkoje naudoto hidrotechninio betono paviršiuje armatūros korozijos proceso sukeltos pažaidos.



3.4 pav. Armatūros korozijos sukelti defektai hidrotechninio betono paviršiuje: 1 – pažaidų vietos
Fig. 3.4. Reinforcement corrosion induced defects in hydrotechnical concrete surface: 1 – damage locations

Armatūros korozijos procesui didelę įtaką turi betono laidumas vandeniui ir druskų tirpalams. Mokslininkai nagrinėjo didžiausius defektus statiniuose sukeliančias korozijas, išskirdami dvi gelžbetoninių konstrukcijų korozijos rūšis: betono korozija – kai betonas suyra, veikiamas agresyviosios aplinkos; armatūros korozija – betono armatūros irimas dėl betone vykstančios karbonizacijos ir druskų, t. y. sulfatų ir chloridų poveikių.

Naudojant hidrotechninį betoną Baltijos jūros aplinkos poveikiai sukelia ir hidrotechninio betono paviršiaus eroziją, kuri atsiranda dėl mechaninio pobūdžio poveikių – dėl bangavimo intensyvumo ir laivų judėjimo Klaipėdos jūrų uosto akvatorijoje. Hidrotechninio betono erozijos procesus nagrinėjo Horsczaruk (2008). 3.5 paveiksle pateikti hidrotechninio betono paviršiaus erozijos atvejai Klaipėdos jūrų uosto hidrotechnikos statiniuose.



3.5 pav. Hidrotechninio betono paviršiaus erozija:

1 – erozijos židiniai

Fig. 3.5. Surface erosion of hydrotechnical concrete:

1 – points of erosion

Aplinkos poveikiai BJA naudojamame betone sukelia betono korozinius procesus. Jūros vanduo, patenkantis į hidrotechninį betoną, išplauna tirpiąsias betono sudedamąsias dalis, t. y. kalcio hidroksidą, kuris reaguoja su ore esančiu anglies dvideginiu ir karbonizuojasi. Minėti procesai sukelia baltų „apnašų“ atsiradimą hidrotechninio betono paviršiuje (3.6 pav.).



3.6 pav. Kalcio hidroksido išplovimo požymiai
hidrotechninio betono paviršiuje: 1 – kalcio hidroksido išplovimas iš betono

Fig. 3.6. Images of effluorescence of calcium hydroxide
on hydrotechnical concrete surface: 1 – calcium hydroxide leaching out of the concrete

Hidrotechnikos statinių statybos techniniai reglamentuose (STR), kurie taikomi Lietuvos Respublikoje projektuojant ir eksploatuojant hidrotechnikos statinius, numatomos periodinės tokių statinių apžiūros ir techninės būklės vertinimas eksploatacijos metu. Atliekant hidrotechnikos statinių techninės būklės vertinimus instrumentiniu būdu, gali būti nustatomi deformacijų dydžiai, bendra techninė būklė, o, esant hidrotechnikos statinių techninės būklės neilinei apžiūrai, papildomai taikomi laboratoriniai (eksperimentiniai) ar kameraliniai lauko, fizikiniai ar cheminiai tyrimo metodai (STR 1.12.08:2010, STR 2.02.06:2004, STR 2.05.15:2004). Neleistini defektai ir pažaidos, kuriuos nedelsiant būtina pašalinti hidrotechnikos statinių gelžbetoninėse konstrukcijose, yra tokie: elementai iškrypę ir praradę pastovumą; trūksta ryšio elementų arba elementų laikančiosiose konstrukcijose arba yra suirusių elementų. Hidrotechnikos statinių eksploatacinės pažaidos nustatomos vizualinių apžiūrų metu, atskirų defektų pažaidoms įvertinti naudojama atitinkama aparatūra. Šiuo metu norminiuose dokumentuose numatomas tik mechaninių poveikių vertinimas projektuojant hidrotechnikos konstrukcijas ir tokių poveikių sukiamų pažaidų vertinimas eksploatacijos metu, tačiau mažai dėmesio kreipiama į hidrotechninio betono ilgaamžiškumo parametrus. Hidrotechnikos statinių konstrukcijų, eksploatuojamų agresyviojoje aplinkoje, ilgaamžiškumo reikalavimams užtikrinti reikia numatyti pagrindinius parametrus, tokius, kad hidrotechnikos konstrukcija atlaikytų visą nustatytą eksploatacijos trukmę agresyviomis sąlygomis ir atitiktų tinkamumo naudoti reikalavimus.

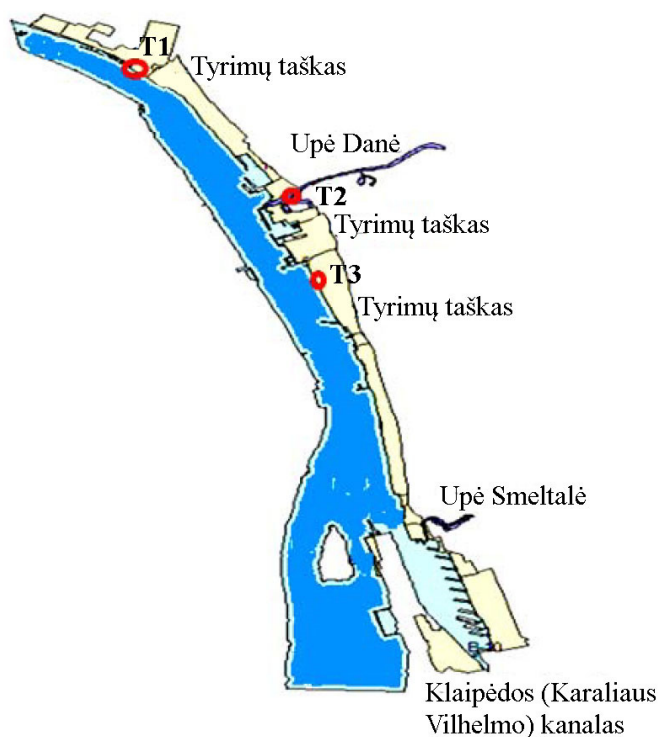
Hidrotechnikos statinių pažaidų bei deformacijų priežastimi gali būti ir projektavimo klaidos, statybos darbų vykdymo klaidos, naudojimo sąlygų pažaidos (konstrukcijų perkrovos, neefektyvi apsauga nuo agresyviosios

aplinkos poveikio, nekokybiška antikorozinė apsauga ir kt.). Tokių veiksmų sukelti konstrukcijų defektai disertacijoje nenagrinėjami.

Svarbu nustatyti ir ištirti hidrotechninio betono naudojimo sąlygas, veikiant Baltijos jūros vandeniui bei cikliško užšaldymo ir atšildymo procesams, ir jas pritaikyti naujai projektuojamiems hidrotechnikos statiniams. Tikslinga patobulinti hidrotechninio betono, kurio paviršių veikia Baltijos jūros vanduo bei kiti klimato poveikiai, cikliški užšaldymo ir atšildymo bei korozijos procesai, ilgaamžiškumo bandymo metodiką, įvertinant hidrotechninio betono irimą sukeliančius veiksniai.

3.1.2. Druskų kiekis Baltijos jūros vandenyje

Druskų kiekis, esantis Baltijos jūros vandenyje, nustatytas atlikus šio vandens cheminę analizę pagal metodiką, aprašytą 3.1.2 poskyryje. Cheminė analizė buvo atlikta trijose pasirinktose Kuršių marių akvatorijoje vietose (3.7 pav.).



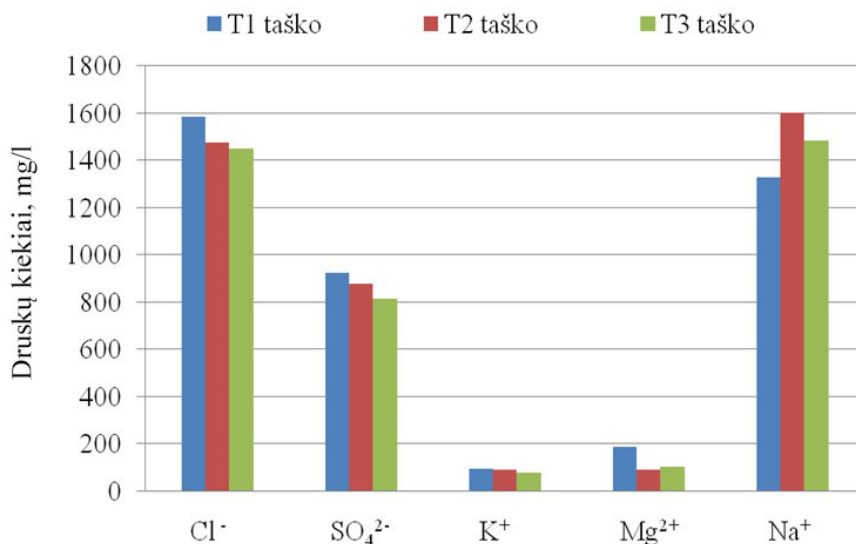
3.7 pav. Klaipėdos uosto akvatorijos teritorija ir betono bandinių ėmimo vietos

Fig. 3.7. The territory of the Klaipėda seaport with concrete sampling points

Mokslininkai tyrė visą Baltijos jūros vandens veikiamą Klaipėdos jūrų uosto teritoriją bei jai priklausančias pakrantes ir dugno nuosėdose nustatė druskų bei kitų medžiagų kiekius. Šių tyrimų metu nustatytas chloridų kiekis Baltijos jūros vandenyje siekė iki 1250 mg/l, sulfatų – 1150 mg/l. (Jokšas, Mokrik 2003) 3.8 paveiksle pateikta bandinių paėmimo vietų padėtis Klaipėdos uosto teritorijoje. T1 taškas buvo pasirinktas arčiausiai Klaipėdos uosto teritorijos šiaurinių vartų, todėl ir gauti druskų kiekiai yra didžiausi, T2 – taškas pasirinktas sankirtoje tarp Kuršių marių ir Danės upės (gėlo) vandens, T3 – taškas pasirinktas beveik vidurinėje Klaipėdos uosto teritorijos dalyje.

Klaipėdos uosto akvatorijos teritorija yra pailgos formos. Agresyviausias aplinkos poveikis pasireiškia T1 taške ties šiauriniais vartais prie Melnragėje esančio molo. Čia yra didesnis vandens druskingumo rodiklis, dažnesni oro temperatūros svyravimai, didesnis vėjuotumas. Kitas ribinis T3 taškas pasirinktas remiantis Jūrinių tyrimų centro atlikto monitoringo duomenimis, esantis vidurinėje Klaipėdos jūrų uosto dalyje, kurioje intensyviausia krovos darbų apimtis ir didžiausia vandens tarša. T2 taškas pasirinktas palyginimui su kitais taškais T1 ir T3. T2 taškas yra Danės upės žiotyse esančioje krantinėje, eksploatuojamoje Klaipėdos miesto savivaldybės. Kadangi Danės upė laikoma gėlavandens vandens telkiniu, hidrotechninio betono naudojimo sąlygos šioje vietoje yra švelnesnės, palyginti su kitais (T1 ir T3) taškais (3.8 pav.).

3.8 paveiksle pateikti nustatyti druskų kiekiai Klaipėdos jūrų uosto vandenyje T1, T2 ir T3 taškuose.



3.8 pav. Klaipėdos uosto vandenyje esančių druskų katijonų ir anijonų kiekiai
Fig. 3.8. The quantities of salt cations and anions in water at the port of Klaipėda

Iš rezultatų, pateiktų 3.8 paveiksle, matyti, kad Cl^- jonų yra nuo 1430 iki 1580 mg/l, o sulfatų gerokai mažesni kiekiai, kurie sudaro nuo 810 iki 900 mg/l. Maksimalų katijonų kiekį sudaro Na^+ jonai, kurių yra nuo 1340 iki 1597 mg/l, tačiau didesnis Na^+ jonų kiekis yra Danės upės ir Kuršių marių sankirtos vandenyje, o Baltijos jūros vandenyje yra daugiau Mg^{2+} jonų. K^+ jonų yra beveik vienodai tiek Baltijos jūros vandenyje, tiek Danės upės ir Kuršių Marių sankirtos vandenyje.

Pagal betono naudojimo sąlygas reglamentuojantį dokumentą (Europos standartą LST EN 206) tokias naudojimo sąlygas, kuriomis betoną veikia daugiau kaip 600 mg/l sulfatų kiekiai, galima priskirti vidutinio cheminio agresyvumo aplinkai ir tokio betono gamybai reikia naudoti sulfatams atsparius cementus. Sulfatams atsparūs cementai paprastai gaminami su mažu trikalcio aluminato kiekiu arba pridodant aktyviųjų mineralinių priedų, tokių kaip šlakai, pelenai, SiO_2 mikrodulkės.

Baltijos jūros vandenyje yra ir nemažas magnio druskų kiekis (Mg^{2+} siekia iki 200 mg/l), todėl šiose eksploatacijos sąlygose galimas ir betono irimo procesas dėl magnezinės korozijos proceso, eksploatuojant hidrotechninį betoną Baltijos jūros vandenyje.

Kadangi Baltijos jūros vandenyje vyrauja chloridai (3.9 pav.), vertinant hidrotechninio betono ilgaamžiškumą reikia atkreipti dėmesį ne tik į sulfatų kiekį, kaip rekomenduojama šiuo metu norminiuose dokumentuose. Daugiau dėmesio reikėtų kreipti į chloridų kiekį. Chloridai, patekę į hidrotechninį betoną, spartina betono irimą dėl cikliško užšaldymo ir atšildymo ir taip mažina betono, naudojamo BJA, ilgaamžiškumą. Be to, chloridų tirpalai, prasiskverbę per betono apsauginį sluoksnį iki armatūros, skatina armatūros koroziją ir apsauginio betono sluoksnio pleišėjimą ir irimą. Tai rodo ankstesniame poskyryje aprašytos gelžbetoninių konstrukcijų, eksploatuojamų Klaipėdos jūrų uoste, pažaidos.

3.1.3. Baltijos jūros aplinkoje naudojamo hidrotechninio betono fizikinės ir mechaninės savybės

Naudojamo betono pokyčiams ištirti bandiniai buvo paimti iš hidrotechnikos konstrukcijų, eksploatuotų ilgą laiką (daugiau nei 20 metų). Klaipėdos uosto akvatorijos teritorijos ir betono bandinių ėmimo vietų žemėlapyje, vietos T2 ir T3, kuriuose buvo paimti kernai ir laboratorijoje atlikti BJA naudojamo betono bandinių bandymai, pateikti 3.7 paveiksle.

Atlikus vizualinę krantinių apžiūrą buvo parinktos bandinių (kernų) išpjovimo vietos. Betono bandinių ėmimo kernų matmenys buvo skirtingi dėl sudėtingos jų išpjovimo situacijos iš dalinai išardytos krantinės, eksploatuojamos BJA. Kernų išpjovimą komplikavo armatūros strypų, esančių už hidrotechninio betono apsauginio sluoksnio, išsidėstymas betone. Kai kurie

betono kernai iš hidrotechnikos konstrukcijos buvo išpjauti su armatūros strypais. Dėl minėtų priežasčių kernų ilgiai buvo skirtingi. Vėliau kernai buvo supjaustyti į tam tikro ilgio bandinius, kurie buvo paruošti skirtingiems bandymams laboratorijoje atlikti bandymus pagal bandymų metodikas. Naudojant šiuos bandinius buvo nustatytas hidrotechninio betono, naudojamo Baltijos jūros aplinkoje, tankis, gniuždymo stipris, atlikti hidrotechninio betono cheminiai tyrimai, o gauti rezultatai panaudoti hidrotechninio betono ilgaamžiškumo tyrimo metodikai parengti.

Iš 3.1 lentelės pateiktų hidrotechninio betono naudoto BJA fizikinių ir mechaninių savybių rezultatų matyti, kad ilgą laiką naudoto betono vidutinis tankis siekia 2369 kg/m^3 , o gniuždymo stiprio vidurkis lygus $56,5 \text{ MPa}$. Iš gautų rezultatų galima spręsti, kad jis viršija stiprio norminę reikšmę betono, esant projektinei stiprumo markai M450 ir vidutinį betono gniuždymo stiprį, užfiksuotą krantinės statybos metu, lygų $45,8 \text{ MPa}$. Rezultatai rodo, kad naudojamo betono gniuždymo stipris didėja apie 10 MPa . Todėl galima daryti išvadą, kad tokiomis eksploatacijos sąlygomis nepasireiškia tūrinis betono irimas, charakterizuojamas gniuždymo stiprumo mažėjimu. Tokiomis eksploatacijos sąlygomis betone nevyksta tūriniai irimo procesai, išskyrus paviršinių pažaidų susidarymą.

3.1 lentelė. Hidrotechninio betono, naudoto Baltijos jūros aplinkoje (T3 taškas, Klaipėdos uosto), fizikinės ir mechaninės savybės

Table 3.1. Physical and mechanical properties of hydrotechnical concrete exploited in the Baltic sea environment (point T3, curonian lagoon)

Bandinio Nr.	Bandinio skersmuo, mm	Bandinio aukštis, mm	Bandinio masė, kg	Ardomoji jėga, kN	Betono tankis, kg/m^3	Betono gniuždymo stipris, MPa
K1	94,00	97,02	1,58	384,43	2360	55,6
K2	94,00	95,00	1,55	397,06	2352	57,5
K3	94,00	96,07	1,58	347,68	2371	50,3
K4	94,00	96,04	1,56	403,04	2350	58,3
K5	94,00	97,06	1,60	385,35	2380	55,8
K6	94,00	99,01	1,64	423,16	2400	61,3
Vidurkis					2369	56,5

Naudojimo sąlygų įtakai palyginti buvo atlikti analogiški kernų iš Danės upės krantinės betono tankio ir stiprio bandymai. Bandymų rezultatai pateikti 3.2 lentelėje.

3.2 lentelė. Hidrotechninio betono, naudoto Baltijos jūros aplinkoje (T2 taškas, Danės upės), fizikinės ir mechaninės savybės

Table 3.2. Physical and mechanical properties of hydrotechnical concrete exploited in Baltic sea environment (point T2, Dane river)

Bandinio Nr.	Bandinio skersmuo, mm	Bandinio aukštis, mm	Bandinio masė, kg	Ardomoji jėga, kN	Betono tankis, kg/m ³	Betono gniuždymo stipris, MPa
D1	94,20	94,32	1,58	306,90	2430	44,4
D2	94,20	94,09	1,51	397,06	2330	57,5
D3	94,20	91,40	1,52	347,68	2420	50,3
D4	94,20	92,86	1,54	403,04	2400	58,3
D5	94,20	91,65	1,54	385,35	2420	55,8
D6	94,20	92,01	1,56	302,09	2450	43,7
Vidurkis					2408	51,7

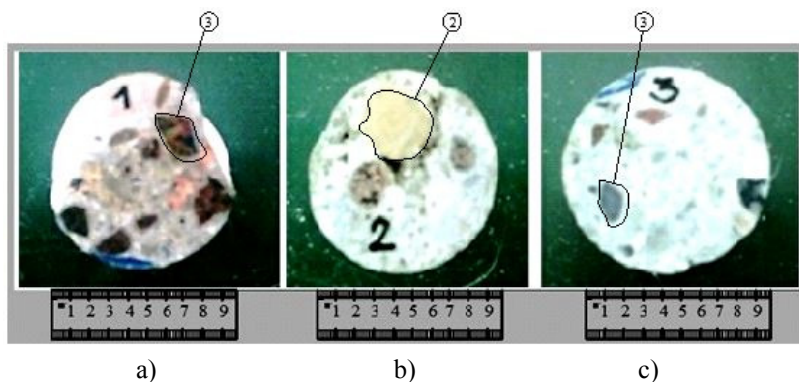
Iš 3.2 lentelėje pateiktų hidrotechninio betono fizikinių ir mechaninių savybių rezultatų matyti, kad ilgą laiką Danės upės krantinėje naudojamo betono vidutinis tankis siekia 2408 kg/m³, o iš hidrotechninio betono vidutinio gniuždymo stiprio lygaus 51,7 MPa. Tai rodo, kad jis viršija betono projektinės stiprumo markės M400 reikiamą stiprio norminę vertę. Rezultatai yra analogiški bandytų betono bandinių iš Klaipėdos uosto akvatorijos krantinės rezultatams ir rodo, kad naudojamo betono gniuždymo stipris didėja apie 10 MPa.

Remiantis gautais bandymo rezultatais galima daryti išvadą, kad kaip ir ankstesnėje bandymų vietoje betonai po ilgo naudojimo hidrotechnikos konstrukcijose Danės upės krantinėse nepatiria tūrinio irimo, išskyrus paviršines pažaidas.

3.1.4. Baltijos jūros aplinkoje naudojamo betono struktūra

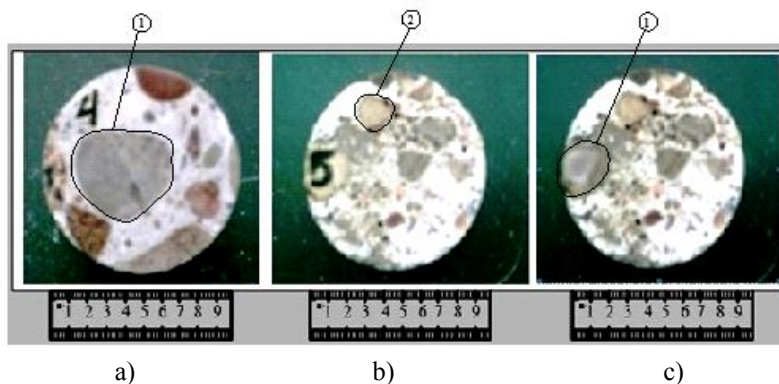
Betono, naudoto Klaipėdos jūrų uosto akvatorijoje esančioje krantinėje, struktūra pateikta 3.9 paveiksle, o naudoto Danės upės krantinėje – 3.10 paveiksle.

Iš 3.9 ir 3.10 paveikslų matyti, kad betonai buvo gaminami su ne tik granito stambiuoju užpildu. Betono gamybai naudotas žvirgždas ar žvirgždo skalda, kurioje yra ir karbonatinių dalelių (kalcito), kurios nuotraukoje yra geltonos spalvos, bei dolomito dalelių, kurios yra pilkos spalvos.



3.9 pav. Klaipėdos jūrų uosto akvatorijoje naudoto hidrotechninio betono bandinių makrostruktūros vaizdai: a) dolomito užpildas (3); b) kalcito užpildas (2); c) granitinės skaldos užpildas (3)

Fig. 3.9. Images of hydrotechnical concrete exploited in Klaipėda sea port equatoria specimens macrostructure: a) dolomite aggregate (3); b) calcite aggregate (2); c) crushed granite aggregate (3)



3.10 pav. Danės upėje naudoto hidrotechninio betono bandinių makrostruktūros vaizdai: a) dolomito užpildas (1); b) kalcito užpildas (2); c) granitinės skaldos užpildas (1)

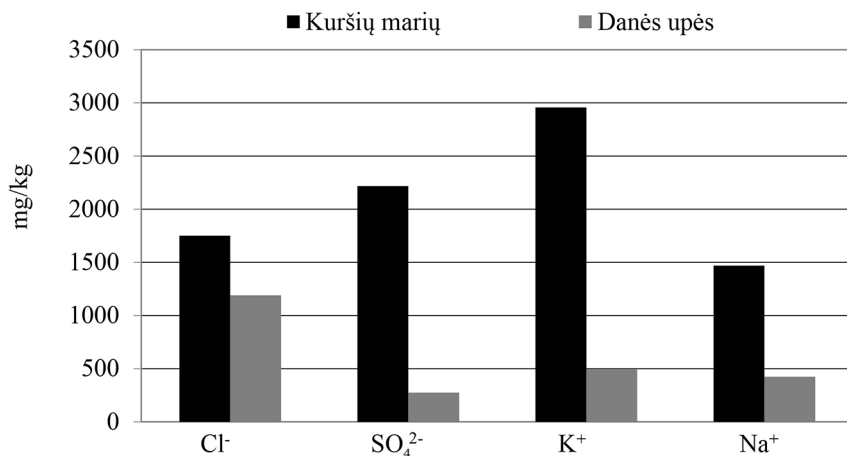
Fig. 3.10. Images of hydrotechnical concrete exploited in Dane river specimens macrostructure: a) dolomite aggregate (1); b) calcite aggregate (2); c) crushed granite aggregate (1)

Hidrotechninio betono gamybai naudotas gana stambios frakcijos žvirgždas arba žvirgždo skalda, kurios dydis siekia net 40 mm. Naudojant hidrotechninį betoną anksčiau minėtomis sąlygomis, neatsparus šalčiui užpildas taip pat gali sukelti naudojamo betono irimo procesus. Tokie defektai dažniausiai pasireiškia

betono paviršiuje atsiradusiais lokaliais cemento akmens atskilinėjimais neatsparaus šalčiui užpildo vietoje.

3.1.5. Druskų kiekis Baltijos jūros aplinkoje naudotame betone

Betono, naudoto Klaipėdos jūrų uoste (T3 taškas) ir Danės upėje (T2 taškas), druskingumai po ilgos naudojimo trukmės pateikti 3.11 paveiksle. Iš Baltijos jūros vandenyje naudotos kerno dalies atpjauti 2 cm storio bandiniai buvo sutrupinti ir smulkinti porcelianinėje grūstuvėje iki miltelių. Anijonų (Cl^- , SO_4^{2-}) ir katijonų (K^+ , Na^+) kiekiai buvo nustatyti atliekant cheminę analizę pagal 2.3 poskyryje aprašytas metodikas. Gauti druskų kiekių betone tyrimų rezultatai pateikti 3.11 paveiksle.



3.11 pav. Druskų kiekiai naudotame hidrotechniniame betone

Fig. 3.13. Quantities of salts in hydrotechnical concrete after exploitation

Iš gautų rezultatų, pateiktų 3.11 paveiksle, matyti, kad druskų kiekis betone, naudotame Klaipėdos uosto teritorijoje ir Danės upėje, labai skiriasi. Klaipėdos jūrų uosto teritorijoje naudotame betone chloridų kiekis siekia 1640 mg/kg, sulfatų kiekis siekia 2400 mg/kg, kalio jonų – 2900 mg/kg, natrio jonų – daugiau nei 1400 mg/kg. Danės upėje nustatyti kur kas mažesni druskų kiekiai, neviršijantys 500 mg/kg, išskyrus chloridų kiekį, kuris siekia iki 1200 mg/kg.

Atlikti tyrimai parodė, kad sulfatų ir chloridų kiekis skiriasi Klaipėdos uosto teritorijos krantinėse ir Danės upės krantinėse. Palyginus su jūros vandenyje esančiais druskų kiekiais, betone nustatyti gerokai mažesni druskų kiekiai. Didelis kalio jonų kiekis betone (dvigubai didesnis nei natrio jonų) gali būti

paaiškinamas toje teritorijoje vykdomais kalio trąšų krovos darbais ir patenkančiu jų kiekiu į jūros vandenį.

Atlikus betono naudoto BJA cheminius tyrimus galima teigti, kad tokioje aplinkoje naudojamam betonui didelę įtaką daro druskų kiekis betone. Atliekant tokioje aplinkoje naudojamo betono ilgaamžiškumo bandymus, reikia vertinti eksploatuojamos aplinkos skystosios fazės druskų cheminę sudėtį ir jų koncentraciją.

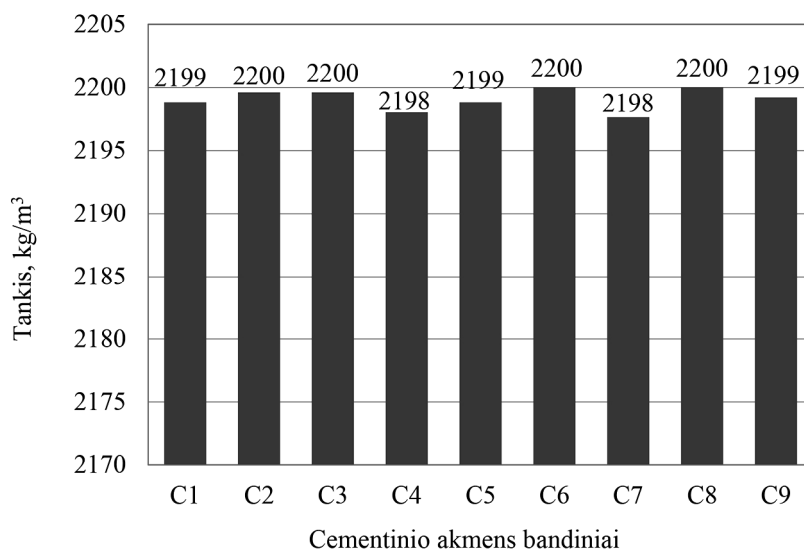
3.2. Mineralinių priedų įtaka betono atsparumui Baltijos jūros aplinkos poveikiui

3.2.1. Mineraliniais priedais modifikuoto cemento akmenis atsparumo Baltijos jūros aplinkos poveikiui tyrimai

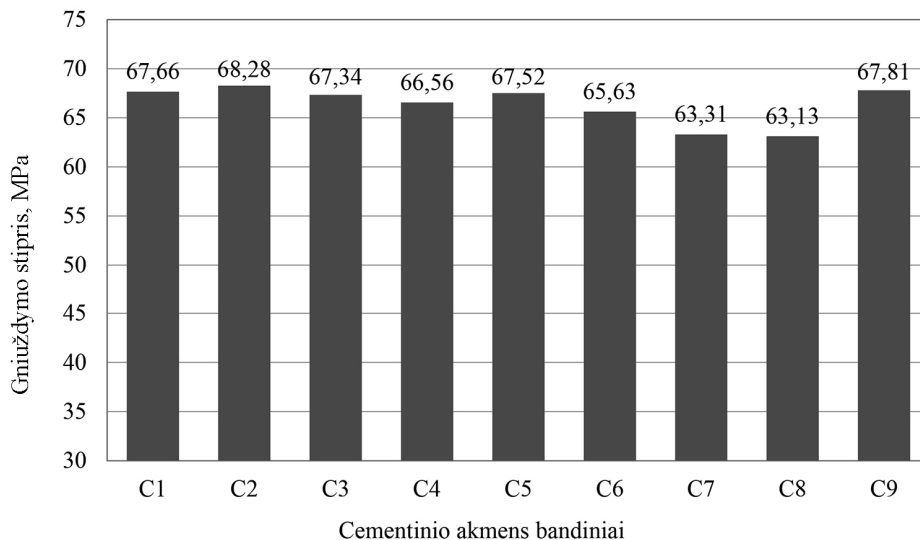
Šiame poskyryje aprašyti jūros vandens poveikio cemento akmeniui bandymai, siekiant nustatyti Baltijos jūros cheminės sudėties tirpalo įtaką destruktiniams procesams, vykstantiems skirtingos sudėties cemento akmenyje ilgalaikio naudojimo metu. Tuo tikslu buvo suformuoti cemento akmenis bandiniai, kurie buvo išbandyti atsparumui ilgalaikiam Baltijos jūros vandens poveikiui. Baltijos jūros vandens cheminę sudėtį atitinkantis tirpalas buvo parinktas pagal 3.1.2 poskyryje pateiktus Baltijos jūros vandens cheminės sudėties bandymo rezultatus.

Cemento tešlų, modifikuotų skirtingais mineraliniais priedais, ilgaamžiškumo BJA bandymas buvo atliktas veikiant Baltijos jūros vandens cheminę sudėtį atitinkančiu druskų tirpalu, sukietėjusio cemento akmenis bandinius įmerkčius iki pusės 56 paras. Apie cemento akmenis ilgaamžiškumą buvo sprendžiama pagal bandinių suirimo lygį. Tyrimams naudoti cementais CEM I 42,5N (cementas be priedų), CEM I 42,5R (cementas be priedų), CEM II/A-LL 42,5N (su 17 % klinties priedu), CEM II/A-S 42,5 N (su 17 % aukštakrosnių šlako priedu) ir CEM III/B 32,5 N-LH/SR (su 70 % aukštakrosnių šlako priedu), modifikuoti 5 % SiO_2 mikrodulkių priedu. Taip pat buvo bandytas CEM I 42,5N modifikuotas dolomito bei skystojo stiklo priedu ir CEM I 42,5R modifikuotas opokos bei skystojo stiklo priedu.

3.12 paveiksle pateiktų cemento akmenis, modifikuoto skirtingais mineraliniais priedais, vidutinio tankio vertės po 28 parų kietėjimo parodė, kad įterpian nuo 5 iki 10 % mineralinių priedų nuo cemento masės, cemento akmenis tankis išlieka toks pats. Cemento akmenis bandinių su skirtingais mineraliniais priedais gniuždymo stipriai po 28 parų kietėjimo svyravo nuo 63 iki 68 MPa ribose, išskyrus opokos, skystojo stiklo ir dolomito mineralinius priedus, kurie sumažino bandinių gniuždymo stiprį 8 % lyginant su bandiniais be priedo ir su 5 % SiO_2 mikrodulkių (3.12 pav., 2.14 lentelė).



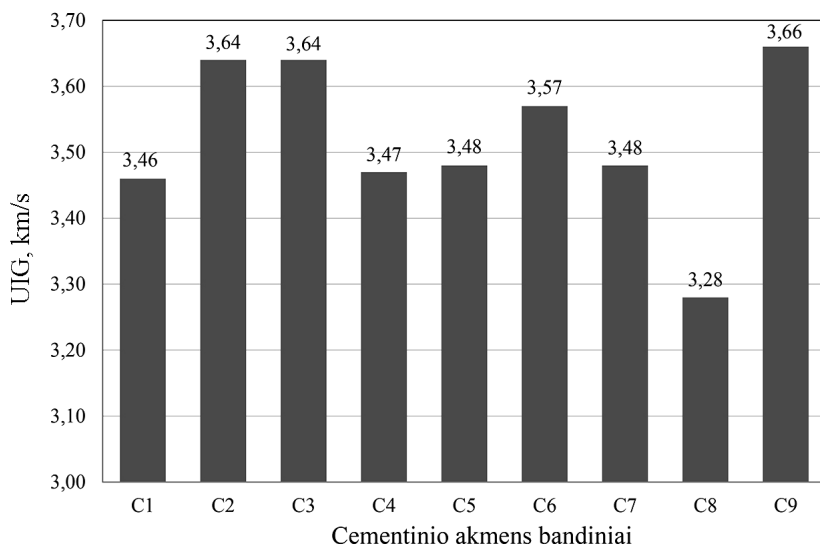
3.12 pav. Cemento akmens su mineraliniais priedais vidutinės tankio vertės
Fig. 3.14. Average density of hardened cement paste with mineral additives



3.13 pav. Cemento akmens su mineraliniais priedais vidutinės
gniuždymo stiprio vertės
Fig. 3.13. Average compressive strength of hardened cement paste
with mineral additives

Mineraliniai priedai yra neorganinės medžiagos, kurios turi pucolaninių arba hidraulinių savybių (Skripkiūnas 2012). Šių medžiagų pridedama į mišinį siekiant pagerinti betono savybes ar pakeisti cemento akmens struktūrą. Cemento akmeniui modifikuoti naudojami įvairių tipų mineraliniai priedai: lakieji pelenai, granuluotas aukštakrosnių šlakas, silicio dioksidas, metakaolinas ir kt. (Xianming *et al.* 2011).

Ultragarso bangų sklaidimo greičio matavimai cemento akmenyje su skirtingais mineraliniais priedais rodo cementinio akmens formavimosi procesų intensyvumą ir defektų (mikroplyšių) formavimosi procesą, t. y. kuo daugiau plyšių atsiranda cemento akmens matricoje, tuo ultragarso sklaidimo greitis bandinyje tampa mažesnis (Vakhshouri, Nejadi 2016). 3.14 paveiksle pateiktos ultragarso bangų sklaidimo greičio cemento akmenyje vertės, priklausomai nuo cemento akmens modifikavimo mineraliniais priedais.



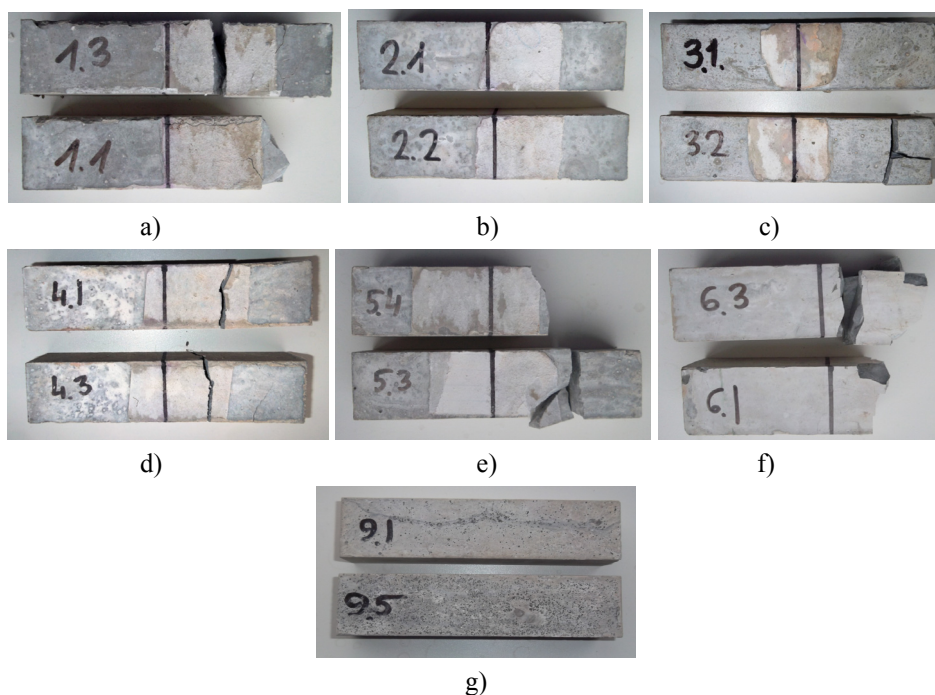
3.14 pav. Cementinio akmens su mineraliniais priedais ultragarso sklaidimo greičio bandymo rezultatai

Fig. 3.14. Results of ultrasonic puls velocity test of hardened cement paste with mineral additives

Iš 3.14 paveiksle pateiktų rezultatų matyti, kad didžiausias ultragarso sklaidimo greitis yra gautas bandant cemento akmenį su SiO_2 mikrodulkių mineraliniu priedu. Mažiausios ultragarso bangų sklaidimo greičių vertės yra nustatytos cemento akmens, modifikuoto mineraliniais priedais: skystuoju stiklu, dolomitu ir opoka. Todėl tolesniems tyrimams mineraliniai priedai: skystasis stiklas, dolomitas ir opoka, nebuvo naudojami.

3.2.2. Jūros vandens druskų tirpalo poveikis cemento akmens ilgaamžiškumui

Cemento gamybos metu ir ruošiant cemento mišinius skirtingais mineraliniais priedais modifikuoto cemento akmens atsparumo Baltijos jūros vandens poveikiui tyrimų rezultatai pateikti 3.15 paveiksle.



3.15 pav. Cemento akmens su skirtingais mineraliniais priedais atsparumo Baltijos jūros vandeniui bandymo rezultatai:

- a) su cemento CEM I 42,5N tipu ir SiO_2 mikrodulkėmis; b) su cemento CEM II/A-S 42,5N tipu ir SiO_2 mikrodulkėmis; c) su cemento CEM II/A-LL 42,5N tipu ir SiO_2 mikrodulkėmis; d) su cemento CEM I 42,5N tipu ir dolomitu; e) su cemento CEM I 42,5N tipu ir skystu stiklu; f) su cemento CEM I 42,5R tipu ir SiO_2 mikrodulkėmis; g) su cemento CEM III 32,5N ir SiO_2 mikrodulkėmis

Fig. 3.15. Results of resistance to Baltic sea water testing with mineral additives: a) with cement CEM I 42,5N type and SiO_2 silica fume; b) with cement CEM II/A-S 42,5N type and SiO_2 silica fume; c) with cement CEM II/A-LL 42,5N type and SiO_2 silica fume; d) with cement CEM I 42,5N type and dolomite; e) with cement CEM I 42,5N type and liquid glass; f) with cement CEM I 42,5R type and SiO_2 silica fume; g) with cement CEM III 32,5N type and SiO_2 silica fume

Cemento akmens bandiniai, modifikuoti skirtingais mineraliniais priedais, išlaikyti Baltijos jūros vandens cheminę sudėtį atitinkančiame tirpale, buvo apžiūrimi ir fotografuojami. Bandinių fotofiksacija atlikta po 2 mėn. išlaikymo jūros vandens cheminės sudėties druskų tirpale. Baltijos jūros vandens atsparumo bandymo rezultatai parodė, kad mineralinis priedas daro didelę įtaką cemento akmens atsparumui Baltijos jūros vandeniui.

Iš 3.15 paveikslo matyti, kad cemento akmuo su šlako portlandcemenčiu ir šlakiniu cementu, modifikuoti SiO_2 mikrodulkių mineraliniu priedu, yra atspariausi Baltijos jūros vandens poveikiui (C2 ir C9 bandiniai). Cemento akmens bandiniai C7 ir C8, modifikuoti opokos ir skystojo stiklo mineraliniais priedais, visiškai suiro į gabalus ir jų fotofiksacija nepateikta.

Atliktas cemento akmens atsparumo Baltijos jūros vandens poveikiui tyrimas parodė, kad cemente esantis mineralinis priedas ir papildomai pridėti mineraliniai priedai daro didelę įtaką cemento akmens, naudojamo BJA ilgaamžiškumui. Iš gautų tyrimų rezultatų galima daryti išvadą, kad Baltijos jūros vandenyje naudojamam betonui geriausiai tinka šlako portlandcementis arba šlakinis cementas su 5 % SiO_2 mikrodulkių priedu.

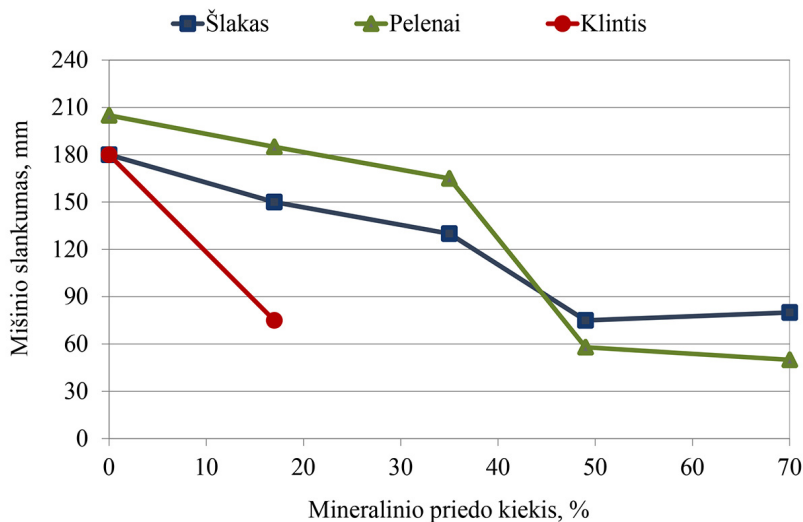
3.3. Hidrotechninio betono, modifikuoto mineraliniais priedais, tyrimai

3.3.1. Hidrotechninio betono, modifikuoto mineraliniais priedais, mišinių technologinės savybės

Pagal cemento akmens, modifikuoto skirtingais mineraliniais priedais, tyrimų rezultatus ir suformuluotas išvadas išbandyti hidrotechninio betono, modifikuoto skirtingu mineralinių priedų (aukštakrosnių šlako, lakiųjų pelenų ir SiO_2 mikrodulkių) kiekiu, bandiniai. Tiriant granuliuto aukštakrosnių šlako įtaką betono atsparumui jūros aplinkos poveikiui, buvo bandyti betonai su skirtingais cementų tipais, turinčiais skirtingą šlako kiekį: CEM I 42,5N, neturinčiu šlako priedo, CEM II A/S 42,5N, turinčiu 17 % šlako priedo ir CEM III 32,5N, turinčiu 70 % šlako priedo.

Tiriant aukštakrosnių šlako, klinties, lakiųjų pelenų ir SiO_2 mikrodulkių įtaką betono atsparumui Baltijos jūros aplinkos poveikiui, buvo nustatytos betono mišinių technologinės savybės su skirtingais anksčiau minėtų mineralinių priedų kiekiais cemente. Betono mišiniai su skirtingais lakiųjų pelenų ir klinties kiekiais buvo ruošiami pakeičiant atitinkamą cemento kiekį reikiamu lakiųjų pelenų arba klinties kiekiu pagal masę.

Nustatytas betono mišinio slankumas, tankis ir oro kiekis betono mišinyje. Betono mišinių su skirtingais mineralinių priedų kiekiais technologinės savybės pateiktos 3.16–3.18 paveiksluose.

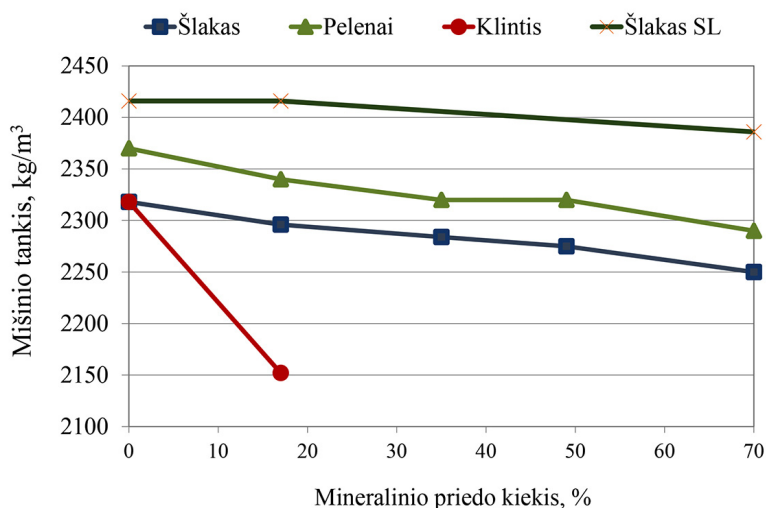


3.16 pav. Hidrotechninio betono su skirtingu mineralinio priedo kiekiu mišinio slankumo bandymų rezultatai

Fig. 3.18. Hydrotechnical concrete with different mineral additive content mixture slump testing results

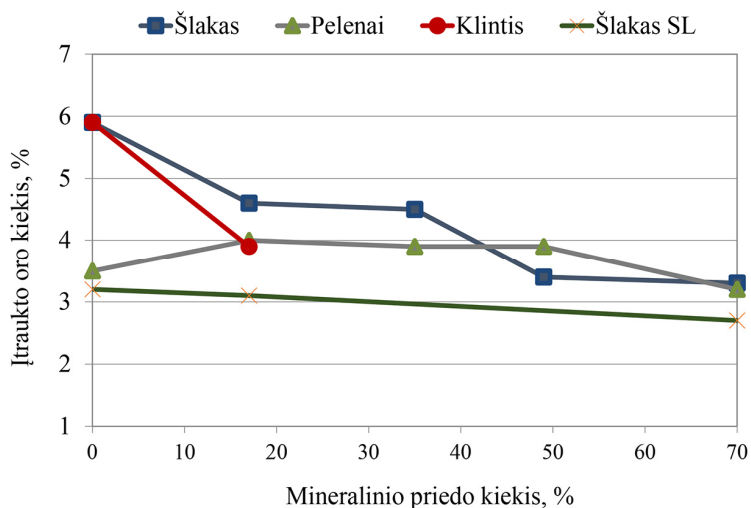
Betono mišiniai su skirtingais cementais (portlandcemenčiu, sudėtiniu portlandcemenčiu CEM II A/S ir šlako cementu CEM III/B) buvo ruošiami vienodo slankumo (85–105 mm), parenkant reikiamą vandens kiekį. Betonų su skirtingų tipų cementais sudėtyms pateiktos 2.15 lentelėje. Betono su skirtingų tipų cementais stiprumas po 28 parų kietėjimo mažai skyrėsi ir siekė 73–76 MPa.

Betono mišinio slankumas, didėjant šlako kiekiui cemente iki 70 %, tolygiai mažėja nuo 180 mm iki 80 mm, t. y. esant 70 % šlako sumažėja 56 %. Didėjant pelenų kiekiui cemente iki 70 %, betono mišinio slankumas tolygiai mažėja nuo 209 mm iki 50 mm, t. y. 76 %. Betono mišinio slankumo mažėjimą, pakeičiant cemento klinkerį šlako arba lakiųjų pelenų dalelėmis, sukelia netaisyklinga šlako ir lakiųjų pelenų dalelių forma. Klinties priedas labai sumažina betono mišinio slankumą pridėjus 17 % klinties nuo 180 mm iki 75 mm, t. y. 58 %. Žymus betono mišinio slankumo sumažėjimas, pridedant klinties priedą, kuris gaunamas dėl didesnio klinties vandens įgėrio.



3.17 pav. Hidrotechninio betono su skirtingu mineralinio priedo kiekiu mišinio tankio bandymų rezultatai

Fig. 3.17. Hydrotechnical concrete with different mineral additive content mixture density testing results



3.18 pav. Hidrotechninio betono su skirtingu mineralinio priedo kiekiais įtraukto oro kiekio bandymų rezultatai

Fig. 3.18. Hydrotechnical concrete with different mineral additive content entrained air content testing results

Apibendrinus gautus rezultatus, pateiktus 3.16 paveiksle, galima daryti išvadą, kad, didinant skirtingų mineralinių priedų (aukštakrosnių šlako, lakiųjų pelenų, klinties) kiekiui, mažėja betono mišinio slankumas. Klinties priedas sumažina betono mišinio slankumą kur kas daugiau negu aukštakrosnių šlako arba lakiųjų pelenų priedas. Minėtą mišinio slankumo sumažėjimą reikia vertinti projektuojant betono su šiais mineraliniais priedais betono sudėtis.

Iš pateikto 3.17 paveikslo matyti, kad skirtingas hidrotechninio betono mišinio tankio vertes galima paaiškinti skirtingu oro kiekiu sutankintame hidrotechninio betono mišinyje ir mažesniu papildomai pridedamo mineralinio priedo dalelių tankiu, kuris yra mažesnis už cemento klinkerio tankį.

Vienodo slankumo betono mišinių su skirtingais cementais (portlandcemenčiu, sudėtiniu portlandcemenčiu CEM II A/S ir šlako cementu CEM III/B), 3.17 ir 3.18 paveiksluose pažymėtų „Šlakas SL“, betono mišinio tankis nežymiai mažėjo, didinant aukštakrosnių šlako kiekiui mišinyje.

3.18 paveiksle pateiktos hidrotechninio betono mišinių su skirtingais mineraliniais priedais įtraukto oro kiekio priklausomybės nuo mineralinio priedo kiekio. Įtraukto oro kiekis betono mišiniuose su skirtingais šlako kiekiais mažėja nuo 5,9 % iki 3,3 %, o su skirtingais lakiųjų pelenų kiekiais – tik nuo 3,5 % iki 3,2 %, su klinčių priedu – nuo 5,9 % iki 3,9 %.

Didinant mineralinio priedo kiekį hidrotechninio betono mišinyje, mažėja įtraukto oro kiekis, nesvarbu, kurį iš tirtų mineralinių priedų (aukštakrosnių šlako, lakiųjų pelenų ar klinties) nagrinėtume.

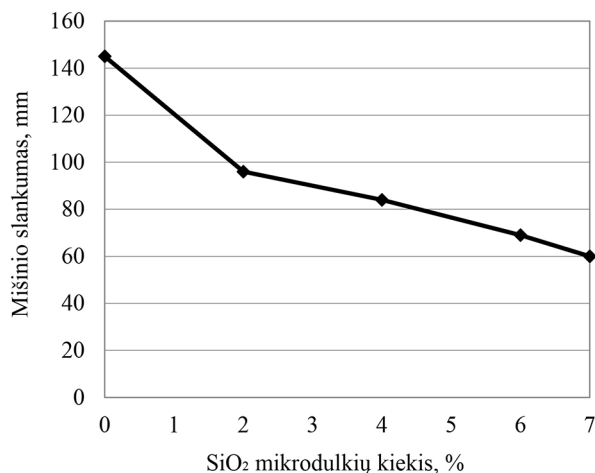
Vienodo slankumo betono mišinių su skirtingais cementais (portlandcemenčiu, sudėtiniu portlandcemenčiu CEM II A/S ir šlako cementu CEM III/B), 3.17 ir 3.18 paveiksluose pažymėtų „Šlakas SL“, įtraukto oro kiekis betono mišinyje nežymiai mažėjo didėjant aukštakrosnių šlako kiekiui mišinyje.

Tolimesni tyrimai buvo atlikti su SiO₂ mikrodulkių mineraliniu priedu kartu su lakiųjų pelenų 17 % priedu. Hidrotechninio betono bandiniai buvo suformuoti pakeitus 17 % cemento klinkerio lakiaisiais pelenais ir papildomai įmaišant SiO₂ mikrodulkių mineralinio priedo 2 %, 4 %, 6 %, 7 % nuo cemento kiekio, atitinkamai sumažinant cemento klinkerio kiekį.

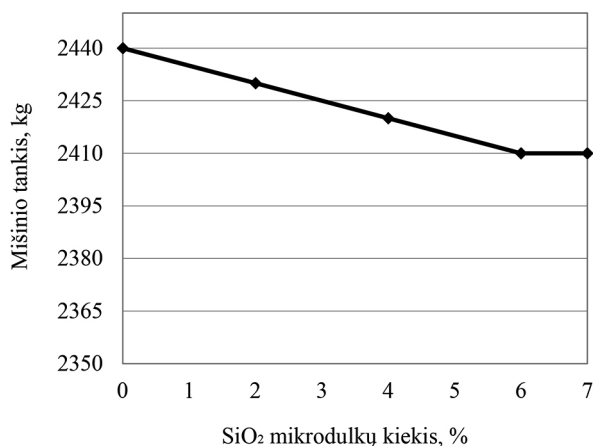
Gauti mišinių su skirtingu SiO₂ mikrodulkių kiekiu konsistencijos bandymų rezultatai pateikti 3.19 paveiksle. Atlikti tyrimai su skirtingais SiO₂ mikrodulkių kiekiais hidrotechniniame betone parodė, kad slankumas mažėjo nuo 146 mm iki 60 mm, didinant SiO₂ mikrodulkių kiekį iki 7 %. Vadinas, galime daryti išvadą, kad SiO₂ mikrodulkių mineralinis priedas kartu su lakiųjų pelenų 17 % priedu labai sumažina hidrotechninio betono mišinio slankumą dėl labai didelio SiO₂ mikrodulkių dalelių smulkumo.

Betono mišinių su skirtingu SiO₂ mikrodulkių kiekiu tankio rezultatai pateikti 3.20 paveiksle. Iš pateiktų duomenų matyti, kad betono mišinio tankis tolygiai mažėja nuo 2446 kg/m³ iki 2410 kg/m³, didėjant SiO₂ mikrodulkių

kiekiui iki 7 % dėl mažesnio SiO_2 mikrodulkių dalelių tankio, palyginti su cemento dalelių tankiu.

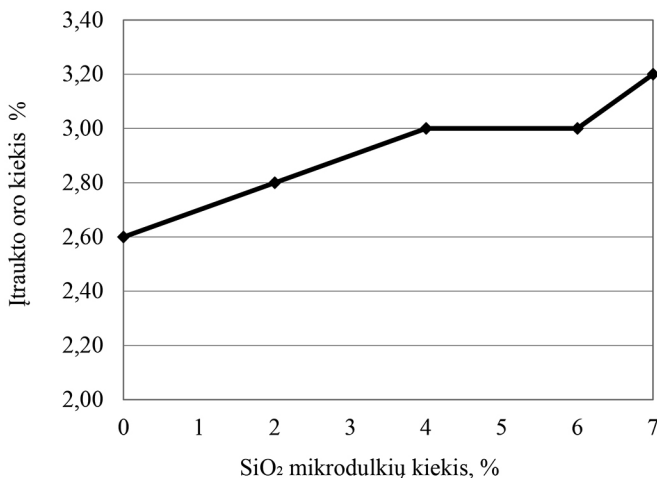


3.19 pav. Hidrotechninio betono su 17 % lakiųjų pelenų ir skirtingu SiO_2 mikrodulkių kiekiu mišinio slankumo bandymų rezultatai
Fig. 3.19. Hydrotechnical concrete with 17% fly ash and different silica fume (SiO_2) content concrete mixture slump testing results



3.20 pav. Hidrotechninio betono su 17 % lakiųjų pelenų ir skirtingu SiO_2 mikrodulkių kiekiu mišinio tankio bandymų rezultatai
Fig. 3.20. Hydrotechnical concrete with 17% fly ash and different silica fume (SiO_2) content concrete mixture density testing results

Betono mišinių su skirtingu SiO_2 mikrodulkių kiekiu įtraukto oro kiekio betono mišinyje rezultatai pateikti 3.21 paveiksle.



3.21 pav. Hidrotechninio betono mišinio su 17 % lakiųjų pelenų ir skirtingu SiO_2 mikrodulkių kiekiu įtraukto oro kiekio bandymų rezultatai
Fig. 3.21. Hydratechnical concrete with 17% fly ash and different silica fume (SiO_2) content entrained air content testing results

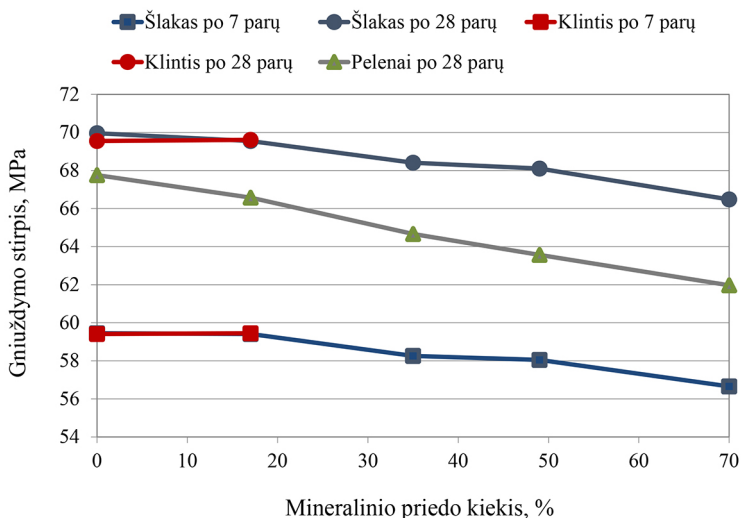
Iš pateiktų rezultatų matyti, kad oro kiekis betono mišinyje tolygiai didėja nuo 2,6 % iki 3,2 %, didėjant SiO_2 mikrodulkių kiekiui iki 7 % dėl ypač didelio SiO_2 mikrodulkių dalelių savitojo paviršiaus.

Iš gautų rezultatų matyti, kad, pakeičiant tam tikrą kiekį cemento skirtingais mineraliniais priedais, betono mišinio konsistencija kinta – mišinio slankumas mažėja dėl didesnio mineralinių priedų dispersiškumo ir netaisyklingsnės jų dalelių formos. Granuliuoto aukštakrosnių šlako, lakiųjų pelenų ir klinties priedai nežymiai sumažina įtraukto oro kiekį betono mišinyje, o SiO_2 mikrodulkių priedas padidina įtraukto oro kiekį.

3.3.2. Hidrotechninio betono, modifikuoto mineraliniais priedais, fizikinės ir mechaninės savybės

Atlikti hidrotechninio betono su skirtingais cementais ir mineraliniais priedais tyrimai parodė, kad didinant šlako kiekį (0 %, 17 % ir 70 %) betono mišinyje reikia padidinti vandens kiekį betono mišinyje (2.15 lentelė), norint gauti tos pačios konsistencijos betono mišinį, reikia didinti šlako kiekį, kuris mažina betono gniuždymo stiprį.

Hidrotechninio betono su mineraliniais priedais (granuliuoto aukštakrosnių šlako, lakiųjų pelenų ir SiO_2 mikrodulkių) gniuždymo stipriai pateikti 3.22 paveiksle. Hidrotechninio betono su 0 %, 17 %, 35 %, 49 %, 70 % aukštakrosnių šlako bei pelenų priedų kiekiais ir 17 % klinties priedu modifikuotų sudėčių gniuždymo stipris mažėja po 7 parų – 3,4 % su 70 % granuliuoto aukštakrosnių šlako priedu, po 28 parų – 5,7 % su 70 % granuliuoto aukštakrosnių šlako priedu bei 8,8 % su 70 % lakiųjų pelenų priedu. 17 % klinties priedas, pakeitus juo atitinkamą kiekį cemento sumažina betono gniuždymo stiprį analogiškai kaip ir aukštakrosnių šlako priedas, t. y. 1,5 %. Minėtų betono stiprių bandymų variacijos koeficientas kinta nuo 0,4 % iki 2,4 %.

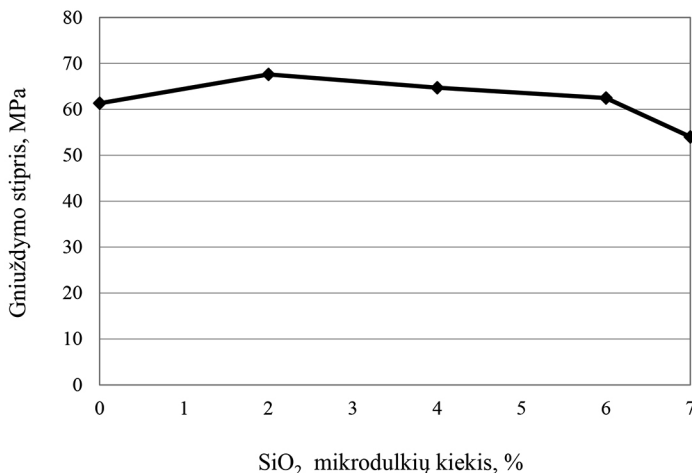


3.22 pav. Hidrotechninio betono su skirtingu mineralinių priedų kiekiu gniuždymo stiprių po 7 ir 28 kietėjimo parų bandymo rezultatai

Fig. 3.22. Hydrotechnical concrete with different mineral additive content compressive strength after 7 and 28 days testing results

Hidrotechninio betono su SiO_2 mikrodulkių priedu stiprumo pokyčiai, keičiant jomis iki 7 % cemento masės, parodyti 3.22 paveiksle. Didinant SiO_2 mikrodulkių kiekį iki 2 %, betono gniuždymo stipris didėja. Tolesnis SiO_2 mikrodulkių kiekio didinimas kiek mažina betono gniuždymo stiprį, tačiau iki 6 % betono stipris išlieka nesumažėjęs, kuris yra sulyginamas su kontrolinio betono (be SiO_2 mikrodulkių) gniuždymo stipriu. Tik SiO_2 mikrodulkių priedo kiekiui viršijus 6 % betono gniuždymo stipris žymiai sumažėja (3.23 pav.) Kiti mokslininkai, vertinę SiO_2 mikrodulkių poveikį betono fizikinėms ir mechaninėms savybėms, atliko tyrimus su betonais, kuriuose SiO_2

mikrodulkėmis buvo keičiama 1, 2 ir 4 % cemento masės, ir nustatė, kad SiO_2 mikrodulkių priedas iki dviejų masės procentų padidina betono gniuždymo stiprį, o tai patvirtina 3.23 paveiksle pateiktų tyrimų rezultatus.



3.23 pav. Hidrotechninio betono mišinio su 17 % lakiųjų pelenų ir skirtingu SiO_2 mikrodulkių kiekiu gniuždymo stiprio po 28 parų kietėjimo bandymų rezultatai

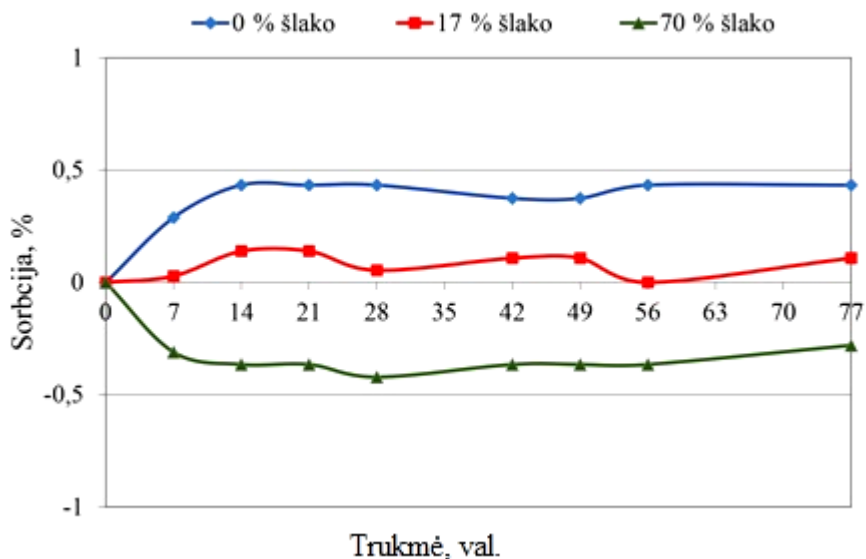
Fig. 3.23. Hydrotechnical concrete with 17% fly ash and different silica fume (SiO_2) content compressive strength after 28 days testing results

Apibendrinus 3.22 ir 3.23 paveiksluose pateiktus tyrimo rezultatus, galima teigti, kad cemento pakeitimas aukštakrosnių šlako, lakiųjų pelenų arba klinties priedais tolygiai mažina betono gniuždymo stiprį, o SiO_2 mikrodulkėmis iki 2 % nuo cemento masės kiek padidina, o iki 6 % nesumažina betono gniuždymo stiprio. Minėtų betono stiprių bandymų variacijos koeficientas kinta nuo 0,6 % iki 2,1 %.

3.3.3. Hidrotechninio betono, modifikuoto mineraliniais priedais, sorbcinės savybės

Tyrimų metu išbandyti hidrotechninio betono bandiniai suformuoti su skirtingo tipo cementais CEM I 42,5N, CEM II A/S 42,5N ir CEM III/B 32,5 N, kuriuose yra 0 %, 17 %, 70 % granuliuoto aukštakrosnių šlako priedo. Šie bandiniai buvo mirkomi Baltijos jūros vandens cheminę sudėtį atitinkančiame druskos tirpale, kurio sudėtis pateikta 2.5.3 poskyryje. Betonų su skirtingu granuliuoto aukštakrosnių šlako priedo kiekiu sorbcijos Baltijos jūros vandens druskų tirpale rezultatai, gauti pagal 2.5.3 poskyryje pateiktą metodiką, pateikti orausaus būklės 3.24 paveiksle, išdžiovintos būklės – 3.25 paveiksle, o įmirkytos būklės – 3.26 paveiksle.

Iš 3.24 paveikslo matyti, kad betono įgėris arba tirpalo džiuvimas (sorbcija ir desorbcija) intensyviai vyksta iki 14 parų, o tolimesnis šių procesų stebėjimas didelių pokyčių neparodė. 3.24 paveiksle pateikti hidrotechninio betono bandinių orasausės būklės su skirtingais cementų tipais arba cimente esančiais skirtingais granuliuto aukštakrosnių šlako kiekiais po 28 parų kietėjimo sorbcijos bandymų rezultatai. Gauti rezultatai parodė, kad hidrotechninio betono bandiniai su CEM I tipo cementu, kuriame nėra granuliuto aukštakrosnių šlako, intensyviai absorbavo druskos tirpalą, t. y. intensyviai vyko sorbcijos procesas. Minėtuose betono bandiniuose druskos tirpalo įgėris didėjo iki 0,5 %. Betono bandiniuose su 17 % granuliuto aukštakrosnių šlako, t. y. CEM II A/S tipo cementu sorbcijos proceso greitis buvo kiek mažesnis ir beveik lygus desorbcijos proceso greičiui, todėl tirpalo įgėris siekė tik iki 0,2 %. Betono bandiniuose su 70 % granuliuto aukštakrosnių šlako, t. y. CEM III/B tipo cementu tirpalo įgėris buvo neigiamas – iki –0,4 %, t. y. bandinys išdžiuvo daugiau, nei įgėrė, ir šiuo atveju pasireiškė desorbcijos procesas.

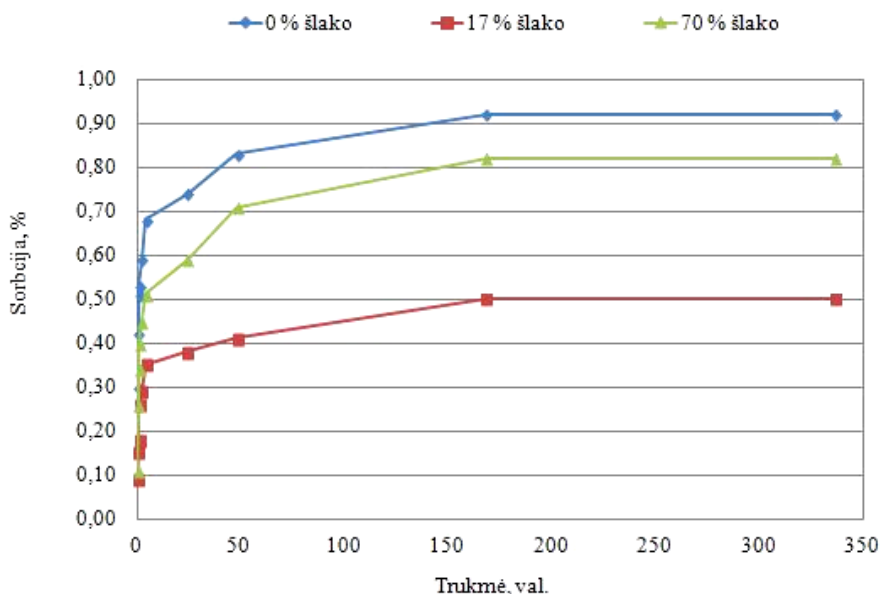


3.24 pav. Orasausių hidrotechninio betono su skirtingu aukštakrosnių šlako kiekiu cimente sorbcijos bandymų rezultatai

Fig. 3.24. Hydrotechnical concrete with different blast furnace slag content in natural humidity conditions sorption testing results

3.25 paveiksle pateikti krosnyje išdžiovintų, hidrotechninio betono bandinių su skirtingais aukštakrosnių šlako kiekiais po 28 parų kietėjimo sorbcijos tyrimų

rezultatai, kurių bandymo metodika aprašyta 2.5.3 poskyryje. Šlako neturintys bandiniai įgėrė daugiausia Baltijos jūros vandens cheminės sudėties atitinkantį druskos tirpalo ir išlaikė jį bandinyje nusistovėjus pusiausvyrai maždaug po dviejų savaitių. Šių bandinių sorbcija po dviejų savaitių siekė 0,9 %. Cementai su 17 % ir 70 % aukštakrosnių šlako pasižymi mažesne sorbcija – su 17 % aukštakrosnių šlako priedu iki 0,7 %, o su 70 % – iki 0,55 %. Galima daryti išvadą, kad didesnis aukštakrosnių šlako priedas mažina hidrotechninio betono sorbciją.

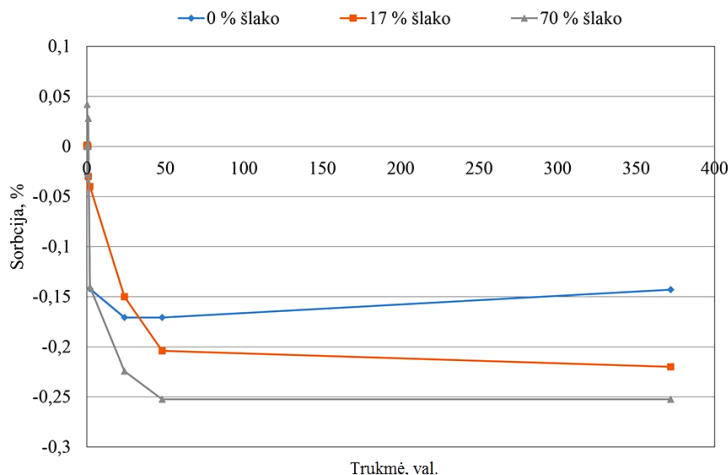


3.25 pav. Išdžiovinto hidrotechninio betono su skirtingu aukštakrosnių šlako kiekiu cemente sorbcijos bandymų rezultatai

Fig. 3.25. Hydrotechnical concrete with different blast furnace slag content in oven dried conditions sorption testing results

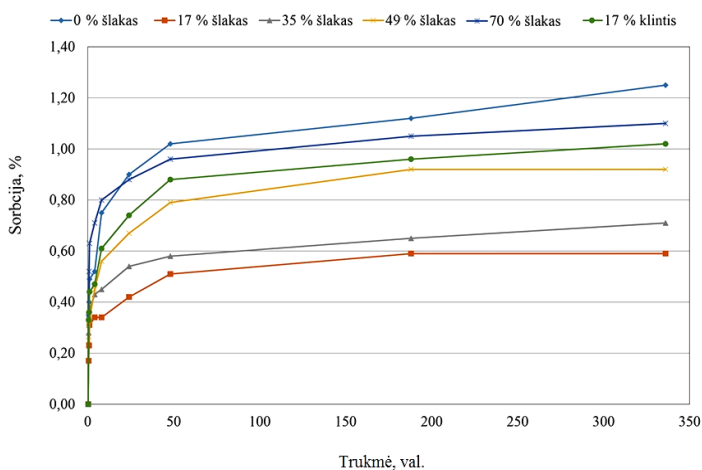
3.26 paveiksle pateikti įmirkytų hidrotechninių bandinių su skirtingais aukštakrosnių šlako kiekiais po 28 parų kietėjimo sorbcijos tyrimų rezultatai. Šiuo atveju vyksta desorbcijos procesai, t. y. druskos tirpalo išgaravimas iš betono bandinių. Šlako neturinčiame cemente pasireiškia mažiausia desorbcija, 17 % aukštakrosnių šlako turinčiame cemente didesnė, o 70 % turinčiame aukštakrosnių šlako cemente – didžiausia. Desorbcijos procesai betone sumažina vandens arba druskos tirpalo kiekį ir padidina jo atsparumą užšaldymo ir atšildymo poveikiui drėgnos būklės.

Atlikti detalesni sorbcijos bandymai su 0 %, 17 %, 35 %, 49 % ir 70 % granuliuto aukštakrosnių šlako kiekiu cementui esant orasausės, įmirkytos ir išdžiovintos būklių. Tyrimų rezultatai pateikti 3.27, 3.28 ir 3.29 paveiksluose.



3.26 pav. Įmirkyto hidrotechninio betono su skirtingu šlako kiekiu cimente desorbcijos bandymų rezultatai

Fig. 3.26. Hydrotechnical concrete with different blast furnace slag content in saturated conditions desorption testing results

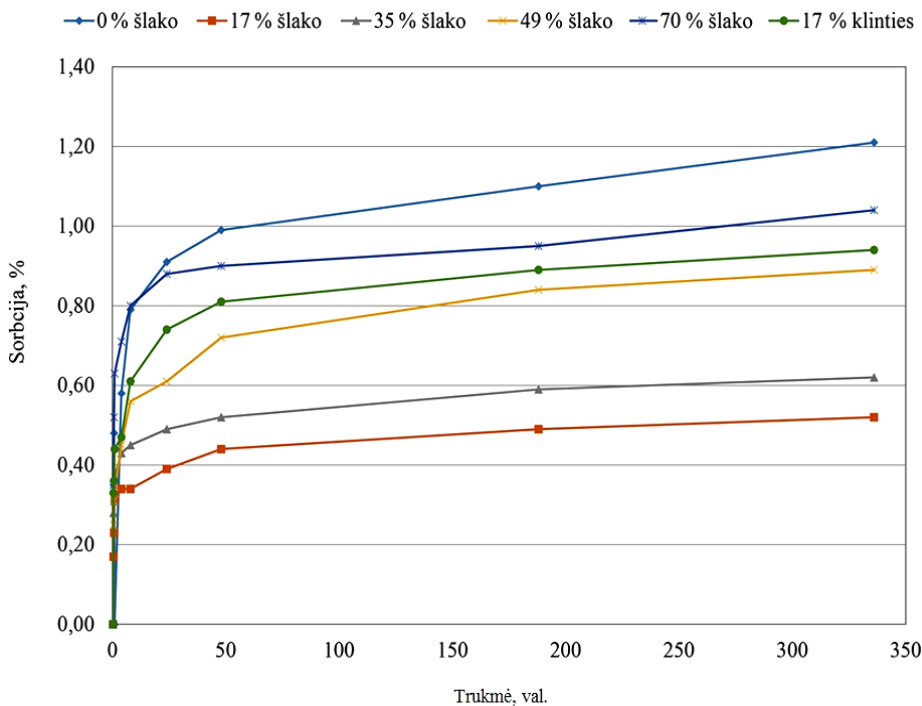


3.27 pav. Orasausių hidrotechninio betono su skirtingu granuliuto aukštakrosnių šlako ir klinties kiekiu cimente sorbcijos bandymų rezultatai

Fig. 3.27. Hydrotechnical concrete with different blast furnace slag and limestone content in natural humidity conditions sorption testing results

3.27 paveiksle pateikti sorbcijos bandymų rezultatai parodė, kad orasausio hidrotechninio betono bandiniai su 17 % ir 35 % šlako priedu cimente turi mažiausią Baltijos jūros vandens druskų tirpalo įgėrį kapiliariniu būdu. Toliau didinant granulioto aukštakrosnių šlako kiekį betone vandens įgėris didėja didėjant betone aukštakrosnių šlako kiekiui iki 70 % granulioto aukštakrosnių šlako priedu. Betono su 17 % klinčių priedu sorbcijos rezultatai panašūs kaip ir betono su 49 % granulioto aukštakrosnių šlako priedu ir siekia apie 1,0 %.

3.28 paveiksle pateiktas hidrotechninio betono su skirtingais granulioto aukštakrosnių šlako kiekiais (0 %, 17 %, 35 %, 49 %, 70 %) ir 17 % klinties kiekiu po 28 parų kietėjimo sorbcijos tyrimų rezultatai, esant išdžiovintos būklės.



3.28 pav. Išdžiovinto hidrotechninio betono su skirtingu granulioto aukštakrosnių šlako ir klinties kiekiu cimente sorbcijos bandymų rezultatai

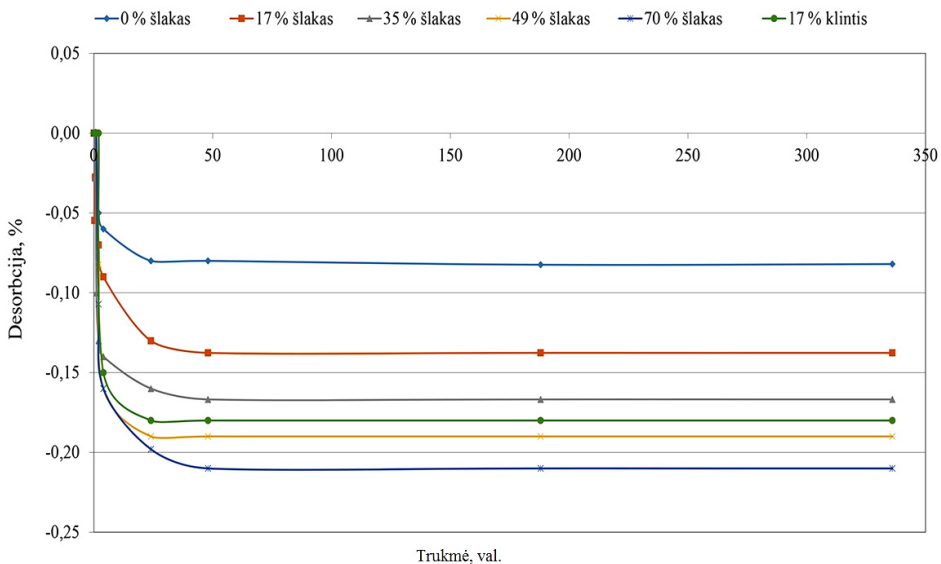
Fig. 3.28. Hydrotechnical concrete with different blast furnace slag and limestone content in oven dried conditions sorption testing results

Gauti analogiški tyrimų rezultatai, kaip ir esant orasausės būklės, rodo, kad mažiausia sorbcija pasižymi bandiniai su 17 % ir 35 % granulioto aukštakrosnių šlako priedu, o didžiausia sorbcija pasižymi bandiniai be

granuliuoto aukštakrosnių šlako priedo. Bandiniai su 17 % klinties priedu pasižymi didele sorbcija, kuri beveik prilygsta bandinių su 70 % granuliuoto aukštakrosnių šlako priedo sorbcijai. Didelės bandinių sorbcijos vertės rodo mažą tokio betono atsparumą užšaldymo ir atšildymo poveikiams, esant drėgnos būklės, ir mažą tokio betono atsparumą BJA poveikiui.

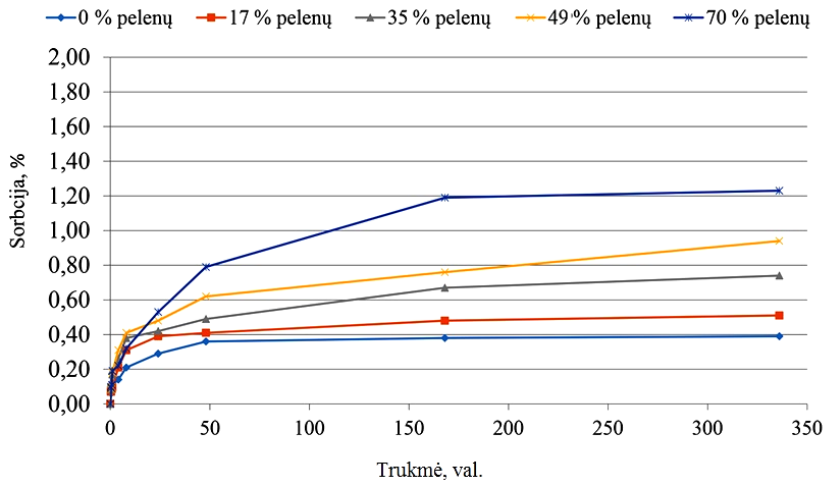
Iš 3.29 paveiksle pateiktų rezultatų matyti, kad didžiausia desorbcija pasižymi tie betono bandiniai su 70 % granuliuoto aukštakrosnių šlako, kuriems būdinga ir didžiausia sorbcija, o mažiausia desorbcija pasižymi bandiniai, neturintys granuliuoto aukštakrosnių šlako priedo.

3.30 paveiksle pateikti hidrotechninio betono bandinių su skirtingais lakiųjų pelenų priedo kiekiais (0 %, 17 %, 35 %, 49 % ir 70 %) po 28 parų kietėjimo sorbcijos tyrimų rezultatai esant orasausės būklės. Kaip matyti iš 3.30 paveiksle pateiktų rezultatų, betono sorbcija didėja didėjant lakiųjų pelenų kiekiui cemente, ypač šiam kiekiui viršijus 17 %. Galima daryti išvadą, kad lakiųjų pelenų priedas didina betono sorbciją, t. y. druskų tirpalo įgėrį ir dėl to mažina betono atsparumą užšaldymo ir atšildymo poveikiui, esant drėgnos būklės, ir jo atsparumą BJA poveikiui.



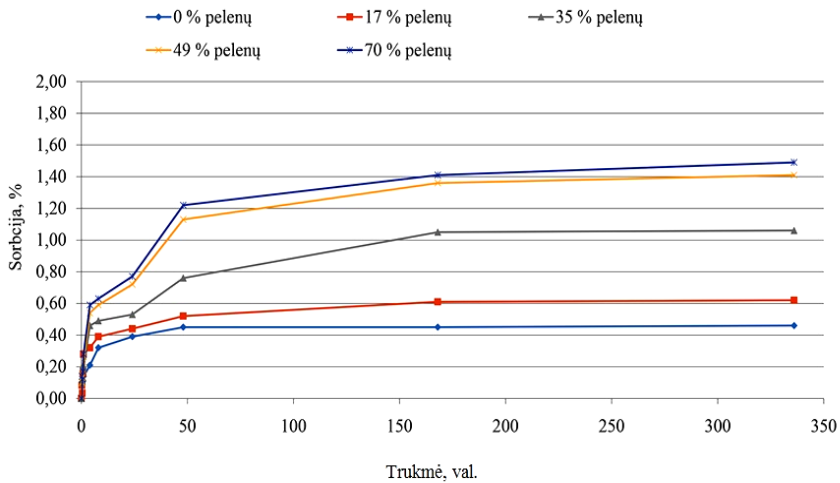
3.29 pav. Įmirkyto hidrotechninio betono su skirtingu granuliuoto aukštakrosnių šlako ir klinties kiekiu cemente desorbcijos bandymų rezultatai

Fig. 3.29. Hydrotechnical concrete with different blast furnace slag and limestone content in saturated conditions desorption testing results



3.30 pav. Orasausių hidrotechninio betono su skirtingu pelenų priedo kiekiu sorbcijos bandymų rezultatai

Fig. 3.30. Hydrotechnical concrete with different fly ash content in natural humidity conditions sorption testing results

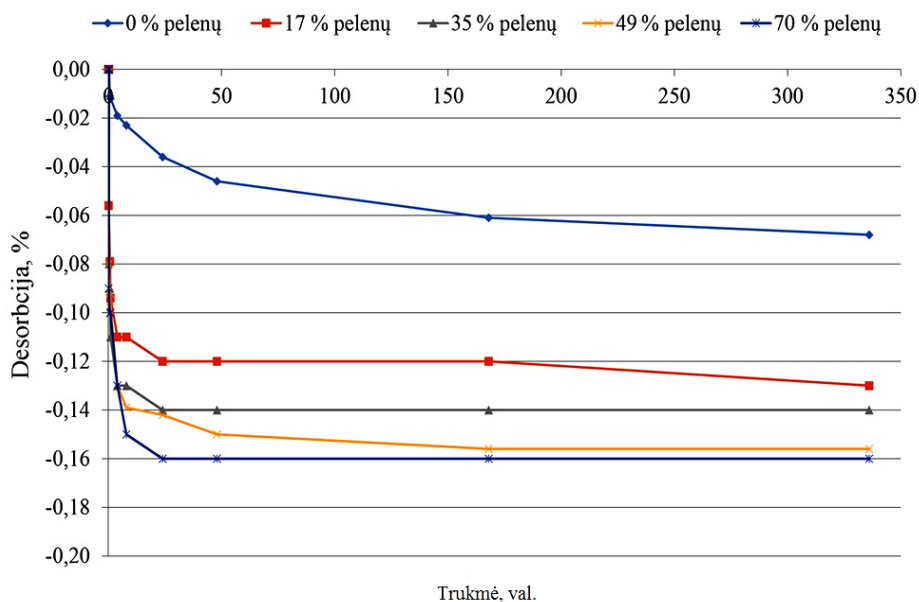


3.31 pav. Išdžiovinoto hidrotechninio betono su skirtingu pelenų priedo kiekiu sorbcijos bandymų rezultatai

Fig. 3.31. Hydrotechnical concrete with different fly ash content in oven dried conditions sorption testing results

3.31 paveiksle pateikti išdžiovinto hidrotechninio betono bandinių su skirtingų lakiųjų pelenų kiekiu sorbcijos rezultatai, kurie yra analogiški esant orasausės būklės gautiems rezultatams. Išdžiovintų bandinių sorbcijos bandymo rezultatai rodo, kad, didinant lakiųjų pelenų kiekį iki 70 %, didėja betono sorbcijos dydis.

Įmirkytų hidrotechninio betono su skirtingais lakiųjų pelenų kiekiais (0 %, 17 %, 35 %, 49 % ir 70 %) desorbcijos tyrimų rezultatai, esant įmirkytos būklės, pateikti 3.32 paveiksle. Iš tyrimų rezultatų matyti, kad didžiausia desorbcija pasižymi bandiniai su 70 % lakiųjų pelenų kiekiu, o mažiausia desorbcija – bandiniai be lakiųjų pelenų.



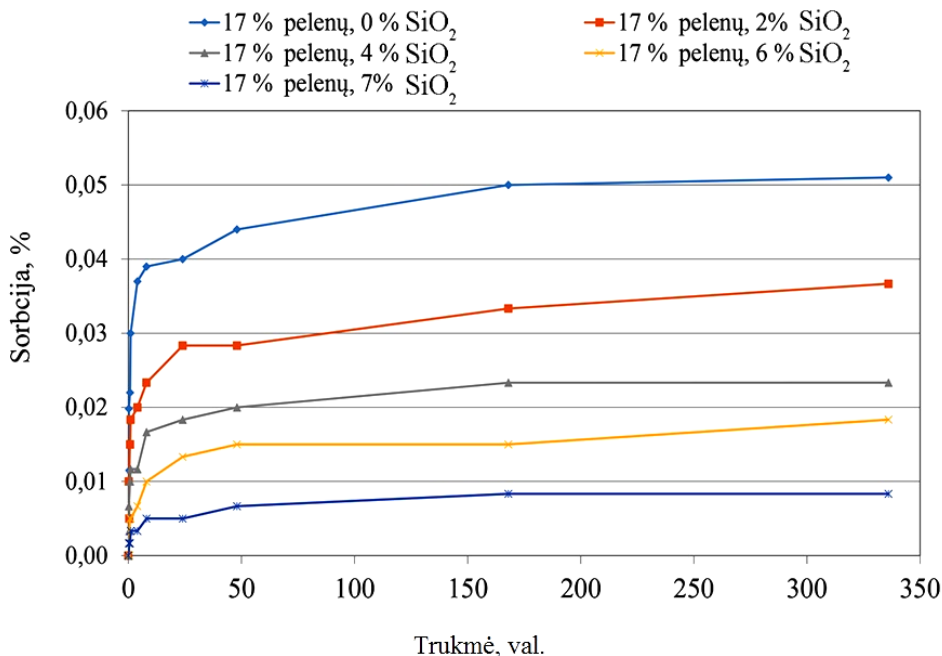
3.32 pav. Įmirkyto hidrotechninio betono su skirtingu pelenų priedo kiekiu desorbcijos bandymų rezultatai

Fig. 3.32. Hydrotechnical concrete with different fly ash content in saturated conditions desorption testing results

3.33 paveiksle pateikta orasausių hidrotechninio betono bandinių su 17 % lakiųjų pelenų priedu ir su skirtingais SiO_2 mikrodulkių priedo kiekiais (0 %, 2 %, 4 %, 6 %, ir 7 %) po 28 parų kietėjimo sorbcijos tyrimų rezultatai. Iš gautų rezultatų, pateiktų 3.35 paveiksle, galima matyti, kad, didėjant SiO_2 mikrodulkių kiekiui iki 7 % nuo cemento masės, tolygiai mažėja betono sorbcijos vertė.

Pakeitus 7 % cemento SiO_2 mikrodulkėmis, sorbcijos vertę galima sumažinti nuo 0,05 % iki labai žemų verčių, siekiančių 0,008 %, t. y. apie 5 kartus.

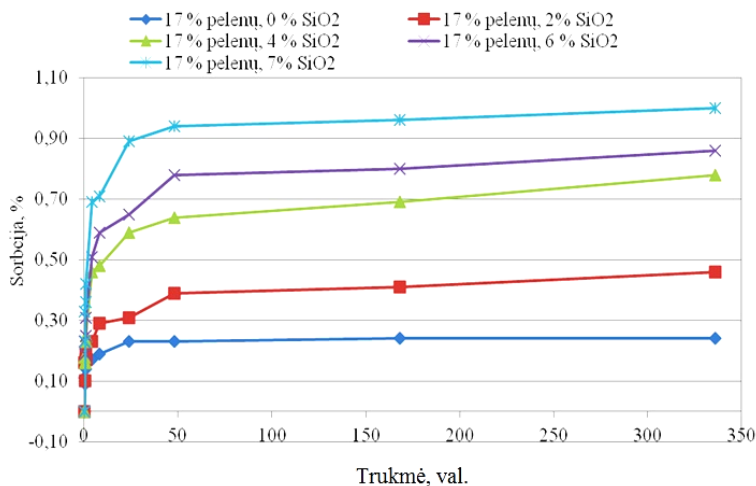
Analogiškai sorbcijos tyrimo rezultatai gauti bandant išdžiovintus hidrotechninio betono bandinius su kompleksiniu lakiųjų pelenų ir SiO_2 mikrodulkių priedais. Didinant SiO_2 mikrodulkių kiekį cemente iki 7 %, mažėja betono sorbcijos vertė ir, esant 7 % SiO_2 mikrodulkių, ji sumažėja apie 5 kartus iki 0,25 % vertės.



3.33 pav. Orasausio hidrotechninio betono su 17 % pelenų ir skirtingu SiO_2 mikrodulkių kiekiu sorbcijos bandymų rezultatai

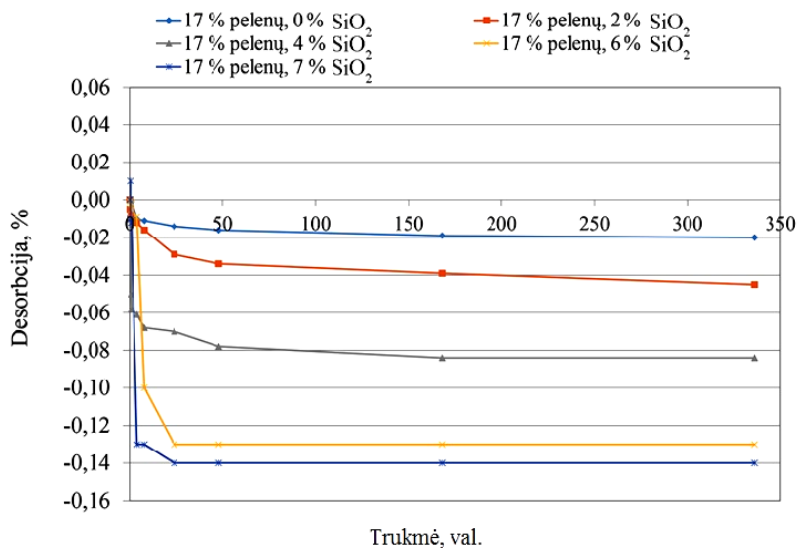
Fig. 3.33. Hydrotechnical concrete with 17% fly ash and different silica fume (SiO_2) content in natural humidity conditions sorption testing results

3.35 paveiksle pateikti įmirkytų hidrotechninio betono bandinių su 17 % lakiųjų pelenų priedu ir su skirtingais SiO_2 mikrodulkių priedo kiekiais (0 %, 2 %, 4 %, 6 % ir 7 %) desorbcijos tyrimų rezultatai. Iš jų matyti, kad hidrotechninio betono bandiniai didžiausia desorbcija pasižymi su 7 % SiO_2 mikrodulkių priedo kiekiu, o mažiausia desorbcija būdinga bandiniams be SiO_2 mikrodulkių priedo.



3.34 pav. Išdžiovinto hidrotechninio betono su 17 % pelenų ir skirtingu SiO₂ mikrodulkių kiekiu sorbcijos bandymų rezultatai

Fig. 3.34 Hydrotechnical concrete with 17 % fly ash and different silica fume (SiO₂) content in oven dried conditions sorption testing results



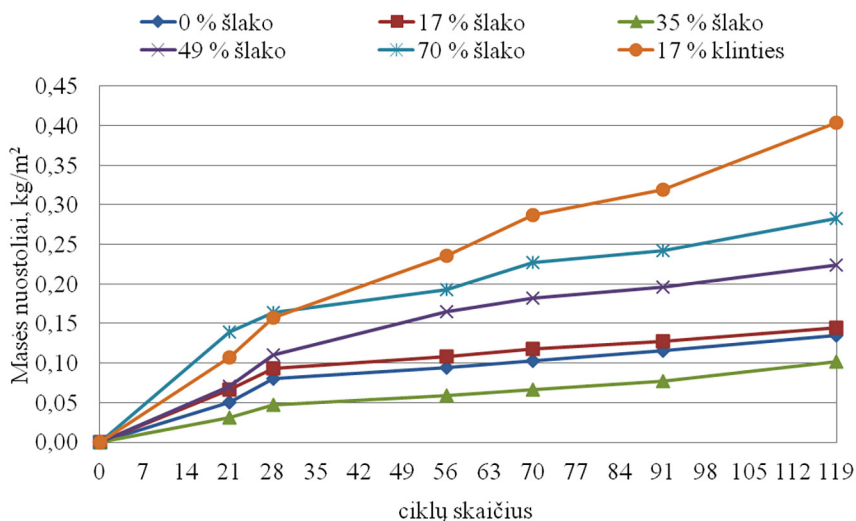
3.35 pav. Įmirkyto hidrotechninio betono su 17 % lakiųjų pelenų ir skirtingu SiO₂ mikrodulkių kiekiu desorbicijos bandymų rezultatai

Fig. 3.34. Hydrotechnical concrete with 17% fly ash and different silica fume (SiO₂) content in saturated conditions desorption testing results

3.3.4. Hidrotechninio betono, modifikuoto mineraliniais priedais, atsparumo Baltijos jūros aplinkos poveikiui tyrimai

Atlikti hidrotechninio betono su skirtingais mineraliniais priedais atsparumo Baltijos aplinkos poveikiui bandymai pagal 2.5.4 poskyryje aprašytą metodiką. Po įmirkymo Baltijos jūros vandens cheminės sudėties druskų tirpale kapiliarinio būdu ir 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 56 ir daugiau užšaldymo ir atšildymo ciklų hidrotechninio betono bandiniai buvo apžiūrėti, nufotografuoti, surinkti nuo bandomojo paviršiaus atskilę fragmentai ir vėl įdėti į Baltijos jūros vandens cheminę sudėtį atitinkantį druskų tirpalą. Bandymas buvo atliekamas toliau.

3.36 paveiksle pateikti masės nuostoliai nuo hidrotechninio betono bandomojo paviršiaus po cikliško užšaldymo ir atšildymo priklausomai nuo aukštakrosnių šlako ir klinties kiekio cemente.



3.36 pav. Hidrotechninio betono su skirtingu aukštakrosnių šlako ir klinties priedu atsparumo Baltijos jūros aplinkos poveikiui bandymo rezultatai

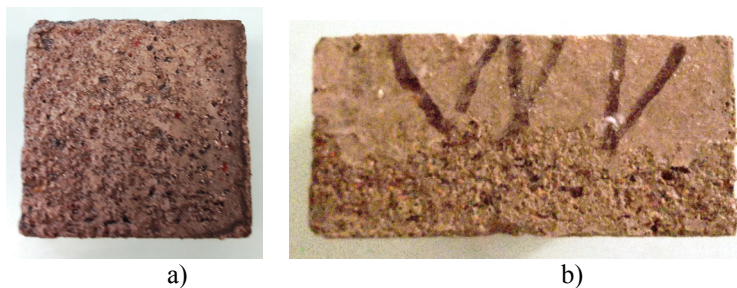
Fig. 3.36. Hydrotechnical concrete containing different contents of blast furnace slag and limestone additives contents resistance to the Baltic sea environment testing results

Kaip matyti iš 3.37 paveikslo, didėjant šlako kiekiui cemente iki 35 %, masės nuostoliai nuo bandomojo paviršiaus mažėja nuo 0,14 iki 0,10 kg/m² po 119 užšaldymo ir atšildymo ciklų Baltijos jūros vandens cheminę sudėtį turinčiame druskos tirpale. Toliau didinant šlako kiekį cemente masės nuostoliai didėja ir su 70 % aukštakrosnių šlako cemente pasiekia 0,29 kg/m². Todėl galima sakyti, kad optimalus aukštakrosnių šlako kiekis cemente, naudojamas betonui Baltijos jūros aplinkoje, yra 35 %.

Klinties portlandcementis, kuriame yra 17 % klinties, parodė neigiamus atsparumo Baltijos jūros aplinkos poveikiui bandymo rezultatus. Masės nuostoliai su šiuo cementu po 119 bandymo ciklų siekė $0,4 \text{ kg/m}^2$, todėl cementai su klinties priedu nėra tinkami betonams, naudojamiems Baltijos jūros aplinkoje. Masės nuostolių matavimo standartinis nuokrypis svyravo nuo $0,03 \text{ kg/m}^2$ iki $0,25 \text{ kg/m}^2$, variacijos koeficientas – nuo 17,3 iki 61,8 %.

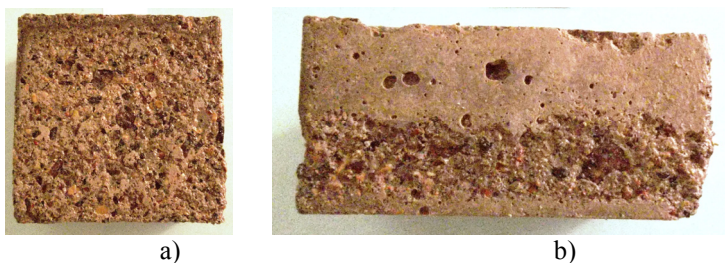
Kaip matyti iš 3.38 paveikslo, didesni bandinių su skirtingu mineraliniu priedu kiekiu masės nuostolių skirtumai išryškėja po didesnio bandymo ciklų skaičiaus (56 ciklai ir daugiau), todėl, norint nustatyti betono atsparumą Baltijos jūros aplinkos poveikiui, reikia atlikti bent 56 bandymo ciklus.

Hidrotechninio betono su skirtingais aukštakrosnių šlako ir klinties priedų kiekiais cementuose fotofiksacija po 119 bandymo ciklų pateikta 3.37–3.41 paveiksluose.



3.37 pav. Hidrotechninio betono be aukštakrosnių šlako bandomojo ir šoninio paviršiaus vaizdas po 119 bandymo ciklų: a) bandinio viršutinis vaizdas; b) bandinio šoninis vaizdas

Fig. 3.37. Testing and side surfaces view of hydrotechnical concrete without blast furnace slag after 119 testing cycles: a) sample top view; b) sample side view



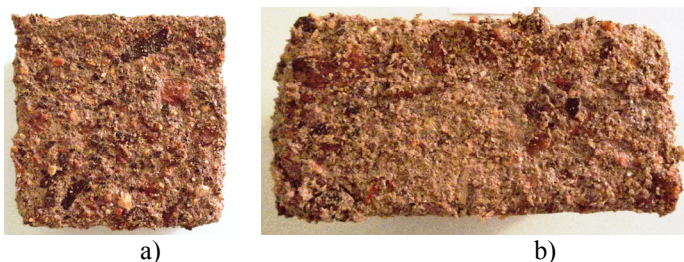
3.38 pav. Hidrotechninio betono su 17 % aukštakrosnių šlako bandomojo ir šoninio paviršiaus vaizdas po 119 bandymo ciklų: a) bandinio viršutinis vaizdas; b) bandinio šoninis vaizdas

Fig. 3.38. Testing and side surfaces view of hydrotechnical concrete with 17% of blast furnace slag after 119 testing cycles: a) sample top view; b) sample side view



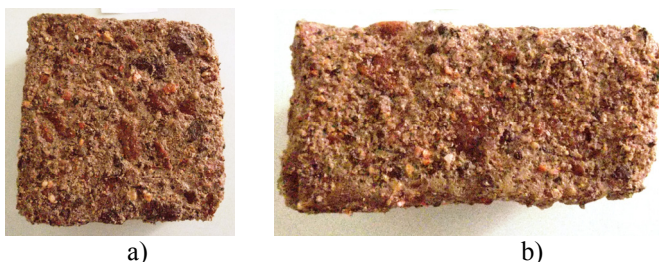
3.39 pav. Hidrotechninio betono su 35 % aukštakrosnių šlako bandomojo ir šoninio paviršiaus vaizdas po 119 bandymo ciklų: a) bandinio viršutinis vaizdas; b) bandinio šoninis vaizdas

Fig. 3.39. Testing and side surfaces view of hydrotechnical concrete with 35% of blast furnace slag after 119 testing cycles: a) sample top view; b) sample side view



3.40 pav. Hidrotechninio betono su 49 % aukštakrosnių šlako bandomojo ir šoninio paviršiaus vaizdas po 119 bandymo ciklų: a) bandinio viršutinis vaizdas; b) bandinio šoninis vaizdas

Fig. 3.40. Testing and side surfaces view of hydrotechnical concrete with 49% of blast furnace slag after 119 testing cycles: a) sample top view; b) sample side view

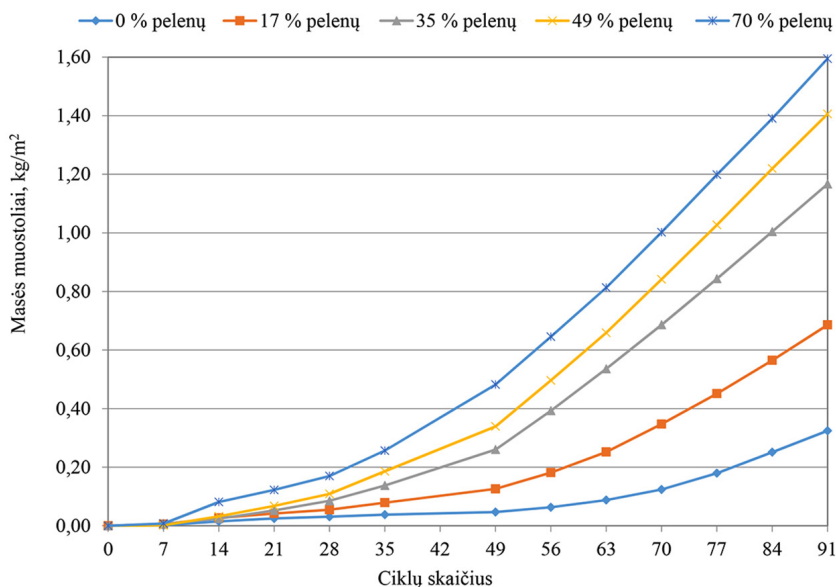


3.41 pav. Hidrotechninio betono su 70 % aukštakrosnių šlako bandomojo ir šoninio paviršiaus vaizdas po 119 bandymo ciklų: a) bandinio viršutinis vaizdas; b) bandinio šoninis vaizdas

Fig. 3.41. Testing and side surfaces view of hydrotechnical concrete with 70% of blast furnace slag after 119 testing cycles: a) sample top view; b) sample side view

Kaip matome iš nuotraukų, mažiausios tiek bandomojo paviršiaus, tiek šoninio paviršiaus pažaidos po 119 bandymo ciklų gaunamos betonuose su 35 % aukštakrosnių šlako turinčiu cementu, o 49 % šlako viršijančiu cementu gaunamos ypač didelės betono paviršiaus pažaidos. Didžiausios betono paviršiaus pažaidos po 119 bandymo ciklų gautos su cementu, turinčiu 17 % klinties priedo.

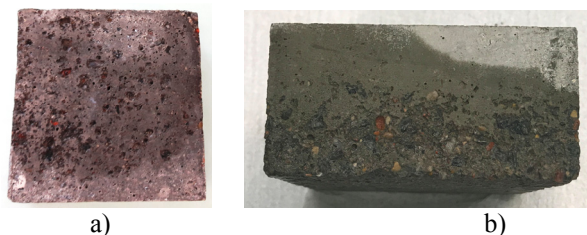
3.42 paveiksle pateikti betono su cementu, turinčiu skirtingus kiekius lakiųjų pelenų priedo (nuo 0 iki 70 %), masės nuostoliai nuo bandomojo paviršiaus. Kaip matome iš 3.42 paveiksle pateiktų rezultatų, masės nuostoliai nuo bandomojo paviršiaus didėja didėjant lakiųjų pelenų kiekiui cemente. Žymus masės nuostolių padidėjimas po 91 bandymo ciklo gaunamas didinant lakiųjų pelenų kiekį iki 35 % ir siekia 0,7 ir 1,19 kg/m², esant pelenų kiekiui 17 % ir 35 % atitinkamai. Didžiausi masės nuostoliai nuo bandomojo paviršiaus gaunami su 70 % lakiųjų pelenų kiekiu cemente ir siekia 1,6 kg/m² po 91 bandymo ciklo. Kaip ir bandant betonus su skirtingu aukštakrosnių šlako kiekiu, taip ir su skirtingu lakiųjų pelenų kiekiu ryškesni masės nuostolių skirtumai gaunami po 56 bandymo ciklų. Masės nuostolių nustatymo standartinis nuokrypis svyravo nuo 0,01 kg/m² iki 0,12 kg/m², variacijos koeficientas – nuo 0,5 % iki 3,9 %.



3.42 pav. Hidrotechninio betono su skirtingu lakiųjų pelenų kiekiu atsparumo Baltijos jūros aplinkos poveikiui bandymo rezultatai

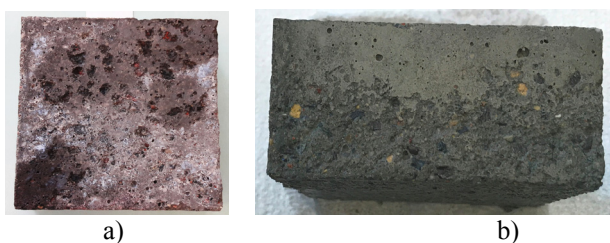
Fig. 3.42. Hydrotechnical concrete containing different contents of fly ash contents resistance to the Baltic sea environment testing results

Hidrotechninių betonų su skirtingais lakiųjų pelenų kiekiais fotofiksacija po 91 bandymo ciklo pateikta 3.43–3.47 paveiksluose.



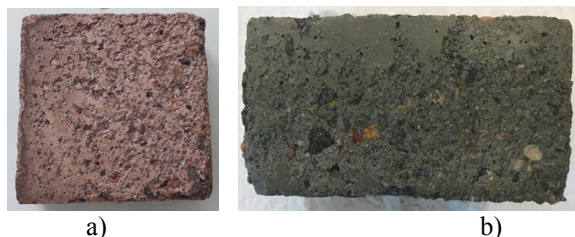
3.43 pav. Hidrotechninio betono be lakiųjų pelenų bandomojo ir šoninio paviršiaus vaizdas po 91 bandymo ciklo: a) bandinio viršutinis vaizdas; b) bandinio šoninis vaizdas

Fig. 3.43. Testing and side surfaces view of hydrotechnical concrete without blast furnace slag after 91 testing cycles: a) sample top view; b) sample side view



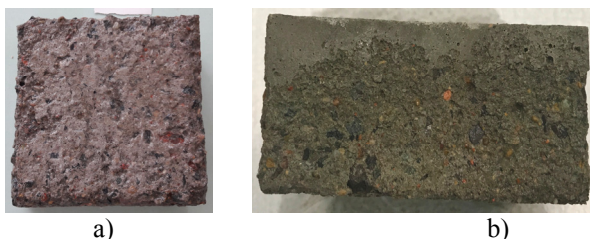
3.44 pav. Hidrotechninio betono su 17 % lakiųjų pelenų bandomojo ir šoninio paviršiaus vaizdas po 91 bandymo ciklo: a) bandinio viršutinis vaizdas; b) bandinio šoninis vaizdas

Fig. 3.44. Testing and side surfaces view of hydrotechnical concrete with 17% of blast furnace slag after 91 testing cycles: a) sample top view; b) sample side view



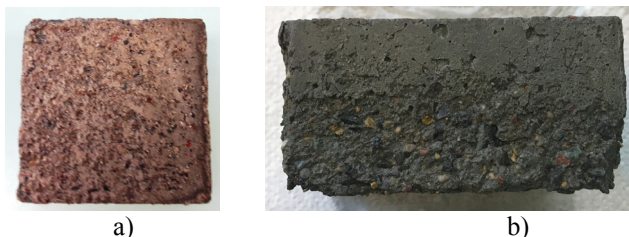
3.45 pav. Hidrotechninio betono su 35 % lakiųjų pelenų bandomojo ir šoninio paviršiaus vaizdas po 91 bandymo ciklo: a) bandinio viršutinis vaizdas; b) bandinio šoninis vaizdas

Fig. 3.45. Testing and side surfaces view of hydrotechnical concrete with 35% of blast furnace slag after 91 testing cycles: a) sample top view; b) sample side view



3.46 pav. Hidrotechninio betono su 49 % lakiųjų pelenų bandomojo ir šoninio paviršiaus vaizdas po 91 bandymo ciklo: a) bandinio viršutinis vaizdas; b) bandinio šoninis vaizdas

Fig. 3.46. Testing and side surfaces view of hydrotechnical concrete with 49% of blast furnace slag after 91 testing cycles: a) sample top view; b) sample side view

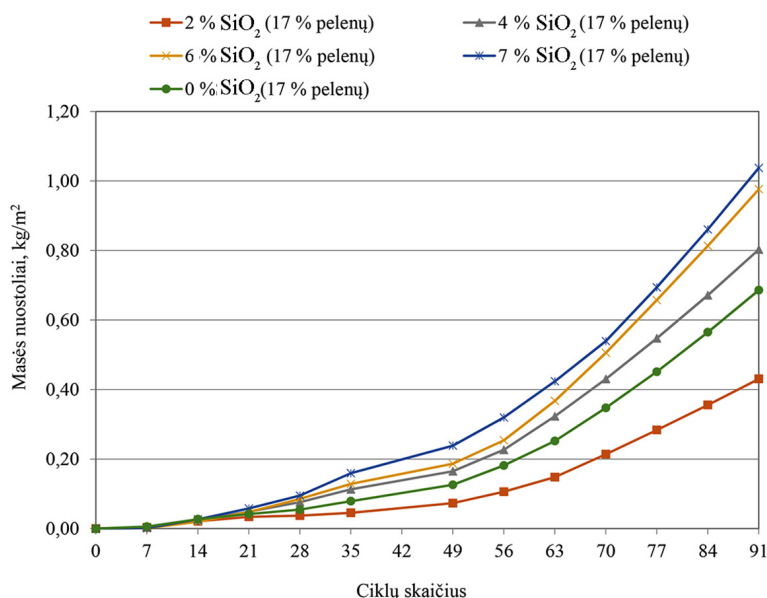


3.47 pav. Hidrotechninio betono su 70 % lakiųjų pelenų bandomojo ir šoninio paviršiaus vaizdas po 91 bandymo ciklo: a) bandinio viršutinis vaizdas; b) bandinio šoninis vaizdas

Fig. 3.47. Testing and side surfaces view of hydrotechnical concrete with 70% of blast furnace slag after 91 testing cycles: a) sample top view; b) sample side view

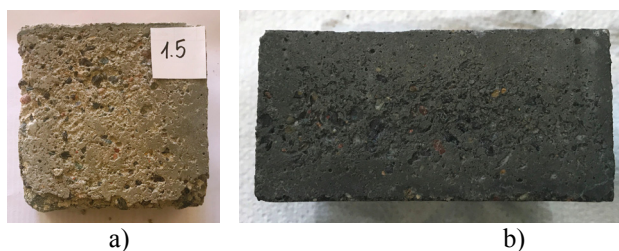
Iš 3.43–3.47 paveikslų matyti, kad tiek bandomojo tiek šoninio paviršiaus pažeidimai didėja, didėjant lakiųjų pelenų kiekiui betone. Tai rodo, kad didelį atsparumą Baltijos jūros aplinkos poveikiui turinčiam hidrotechniniam betonui nėra tinkami cementai su lakiųjų pelenų mineraliniu priedu.

3.43 paveiksle pateikiami betono su cementu, turinčiu skirtingus SiO_2 mikrodulkių kiekius ir 17 % lakiųjų pelenų priedo, masės nuostoliai nuo bandomojo paviršiaus. Iš pateiktų tyrimų rezultatų galima matyti, kad SiO_2 mikrodulkių mineralinio priedo kiekis gerina hidrotechninio betono atsparumą BJA, taip pat mažina bandomojo paviršiaus masės nuostolius iki tam tikros SiO_2 mikrodulkių dozotės ribos, kuri siekia 2 % nuo cemento masės. Su 4 % SiO_2 mikrodulkių pakaitalu gaunami panašūs masės nuostolių rezultatai kaip ir be SiO_2 mikrodulkių. Tolesnis SiO_2 mikrodulkių kiekio didinimas nuo 4 iki 7 % didina bandomojo paviršiaus masės nuostolius, t. y. mažina betono atsparumą Baltijos jūros aplinkos poveikiui. Masės nuostolių nustatymo standartinis nuokrypis vyraavo nuo $0,01 \text{ kg/m}^2$ iki $0,02 \text{ kg/m}^2$, variacijos koeficientas – nuo 0,8 % iki 2,4 %.



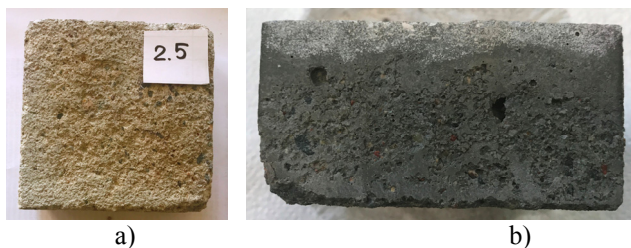
3.48 pav. Hidrotechninio betono su 17 % lakiųjų pelenų ir skirtingais SiO₂ mikroduelių kiekiais atsparumo Baltijos jūros aplinkos poveikiui bandymo rezultatai
Fig. 3.48. Hydrotechnical concrete containing 17% of fly ash and different contents of silica fume (SiO₂) resistance to the Baltic sea environment testing results

Hidrotechninio betono su 17 % lakiųjų pelenų ir skirtingais SiO₂ mikroduelių (0 %, 2 %, 4 %, 6 %, 7 %) kiekiais fotofiksacija po 91 bandymo ciklo pateikta 3.49–3.53 paveiksluose. Iš 3.49–3.51 paveiksluose pateiktų rezultatų matyti, kad po 91 bandymo ciklo geriausi betono paviršiai (tiek bandomasis, tiek šoninis) gaunami su cementu, turinčiu 2 % arba 4 % SiO₂ mikroduelių.



3.49 pav. Hidrotechninio betono su 17 % lakiųjų pelenų ir 0 % SiO₂ mikroduelių bandomojo paviršiaus vaizdas po 91 bandymo ciklo: a) bandinio viršutinis vaizdas; b) bandinio šoninis vaizdas

Fig. 3.49. Testing and side surfaces view of hydrotechnical concrete with 17% of blast furnace slag and 0% of silica fume (SiO₂) after 91 testing cycles : a) sample top view; b) sample side view



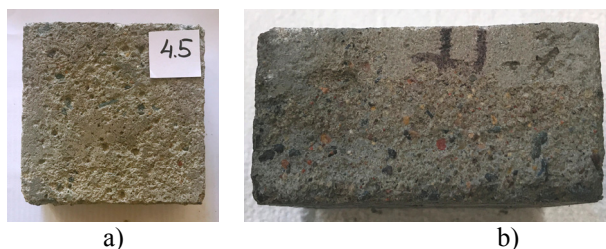
3.50 pav. Hidrotechninio betono su 17 % lakiųjų pelenų ir 2 % SiO_2 mikrodulkių bandomojo ir šoninio paviršiaus vaizdas po 91 bandymo ciklo: a) bandinio viršutinis vaizdas; b) bandinio šoninis vaizdas

Fig. 3.50. Testing and side surfaces view of hydrotechnical concrete with 17% of blast furnace slag and 2% of silica fume (SiO_2) after 91 testing cycles: a) sample top view; b) sample side view



3.51 pav. Hidrotechninio betono su 17 % lakiųjų pelenų ir 4 % SiO_2 mikrodulkių bandomojo ir šoninio paviršiaus vaizdas po 91 bandymo ciklo: a) bandinio viršutinis vaizdas; b) bandinio šoninis vaizdas

Fig. 3.51. Testing and side surfaces view of hydrotechnical concrete with 17% of blast furnace slag and 4% of silica fume (SiO_2) after 91 testing cycles: a) sample top view; b) sample side view



3.52 pav. Hidrotechninio betono su 17 % lakiųjų pelenų ir 6 % SiO_2 mikrodulkių bandomojo ir šoninio paviršiaus vaizdas po 91 bandymo ciklo: a) bandinio viršutinis vaizdas; b) bandinio šoninis vaizdas

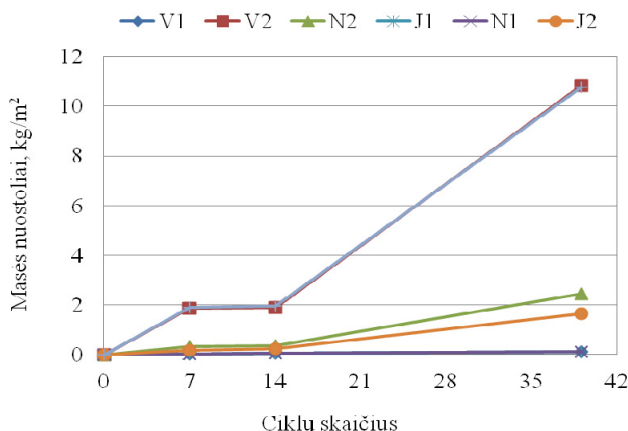
Fig. 3.52. Testing and side surfaces view of hydrotechnical concrete with 17% of blast furnace slag and 6% of silica fume (SiO_2) after 91 testing cycles: a) sample top view; b) sample side view



3.53 pav. Hidrotechninio betono su 17 % lakiųjų pelenų ir 7 % SiO_2 mikroduelių bandomojo ir šoninio paviršiaus vaizdas po 91 bandymo ciklo: a) bandinio viršutinis vaizdas; b) bandinio šoninis vaizdas

Fig. 3.53. Testing and side surfaces view of hydrotechnical concrete with 17% of blast furnace slag and 7% of silica fume (SiO_2) after 91 testing cycles: a) sample top view; b) sample side view

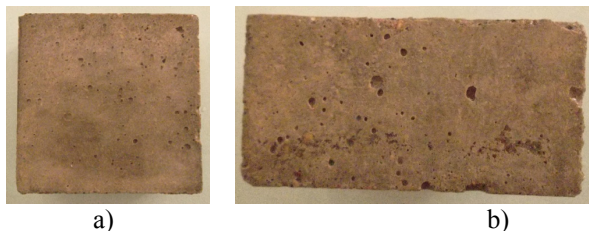
Pagal 2.5.4 poskyryje aprašytą betono atsparumo Baltijos jūros aplinkos poveikiui ilgaamžiškumo bandymo metodiką buvo tiriami betono bandiniai su cementu, kuriame yra 0 % ir 17 % aukštakrosnių šlako, naudojant skirtingas šaldymo terpes: distiliuotą vandenį, Baltijos jūros vandens cheminę sudėtį atitinkantį druskų tirpalą ir 3 % NaCl vandeninį tirpalą. Betono atsparumas Baltijos jūros aplinkos poveikiui įvertintas pagal medžiagos, atskilusios nuo bandomojo paviršiaus po 39 bandymo ciklų, kiekį arba masės nuostolius. 3.54 paveiksle pateikti atliktų bandymų rezultatai, kurių standartinis nuokrypis buvo nuo $0,03 \text{ kg/m}^2$ iki $1,8 \text{ kg/m}^2$, o variacijos koeficientas – nuo 13 % iki 56 %.



3.54 pav. Hidrotechninio betono su 0 ir 17 % aukštakrosnių šlako priedo kiekiu atsparumo Baltijos jūros aplinkos poveikiui su skirtingomis šaldymo terpėmis bandymo rezultatai

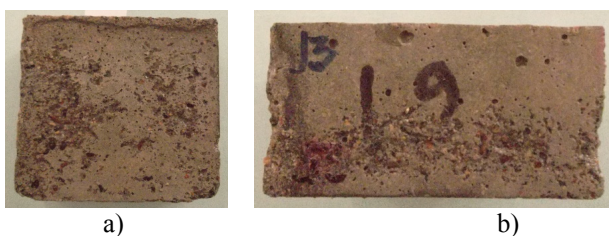
Fig. 3.54. Hydrotechnical concrete containing 0 and 17% of fly ash resistance to the Baltic sea environment with different freezing medium testing results

Hidrotechninio betono su 17 % aukštakrosnių šlako pakaitalu bandinių fotofiksacija po 39 bandymo ciklų pateikta 3.55–3.57 paveiksluose.



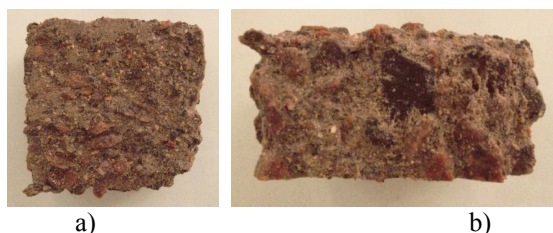
3.55 pav. Hidrotechninio betono su 17 % šlako kiekiu, veikiamo distiliuotu vandeniu, bandomojo ir šoninio paviršiaus vaizdas po 39 bandymo ciklų: a) bandinio viršutinis vaizdas; b) bandinio šoninis vaizdas

Fig. 3.55. Testing and side surfaces view of hydrotechnical concrete with 17% of blast furnace slag saturated in water after 39 testing cycles: a) sample top view; b) sample side view



3.56 pav. Hidrotechninio betono su 17 % šlako kiekiu, veikiamo Baltijos jūros vandens cheminės sudėties tirpalu, bandomojo ir šoninio paviršiaus vaizdas po 39 bandymo ciklų: a) bandinio viršutinis vaizdas; b) bandinio šoninis vaizdas

Fig. 3.56. Testing and side surfaces view of hydrotechnical concrete with 17% of blast furnace slag saturated in Baltic sea water chemical solution after 39 testing cycles: a) sample top view; b) sample side view



3.57 pav. Hidrotechninio betono su 17 % šlako kiekiu, veikiamo 3 % NaCl druskų tirpalu, bandomojo ir šoninio paviršiaus vaizdas po 39 bandymo ciklų: a) bandinio viršutinis vaizdas; b) bandinio šoninis vaizdas

Fig. 3.57. Testing and side surfaces view of hydrotechnical concrete with 17% of blast furnace slag saturated in 3% NaCl water solution after 39 testing cycles: a) sample top view; b) sample side view

Tyrimas su skirtingomis šaldymo terpėmis: distiliuotu vandeniu, Baltijos jūros vandens cheminę sudėtį atitinkančiu druskų tirpalu ir NaCl 3 % tirpalu, parodė, kad Baltijos jūros vandens įtaka betoną ardančiam poveikiui yra didelė ir turi būti vertinama tiriant betono atsparumą BJA poveikiui.

Atliktų tyrimų rezultatai parodė, kad Baltijos jūros vandens cheminę sudėtį atitinkantis druskų tirpalas padidina masės nuostolius, palyginti su distiliuotu vandeniu, nuo nedidelių ($0,21 \text{ kg/m}^2$) iki $1,8$ ir $3,07 \text{ kg/m}^2$ su cementu be mineralinių priedų bei 17 % šlako pakaitalu atitinkamai. Didžiausi destruktiniai procesai sukeliami betone, įmirkytame 3 % NaCl tirpale. Šiuo atveju bandinių masės nuostoliai siekė iki 11 kg/m^2 .

Šių tyrimų rezultatai rodo, kad šaldymo terpė turi didelę įtaką bandant betono atsparumą Baltijos jūros aplinkos poveikiui. Šių bandymų metu norint gauti patikimus rezultatus, turi būti naudojama jūros vandens cheminę sudėtį atitinkantis druskų tirpalas. Anksčiau minėtą bandymo metodiką galima panaudoti ir kitą cheminę sudėtį turinčioje skystoje aplinkoje naudojamam betonui bandyti, atitinkamai pakeičiant šaldymo terpę.

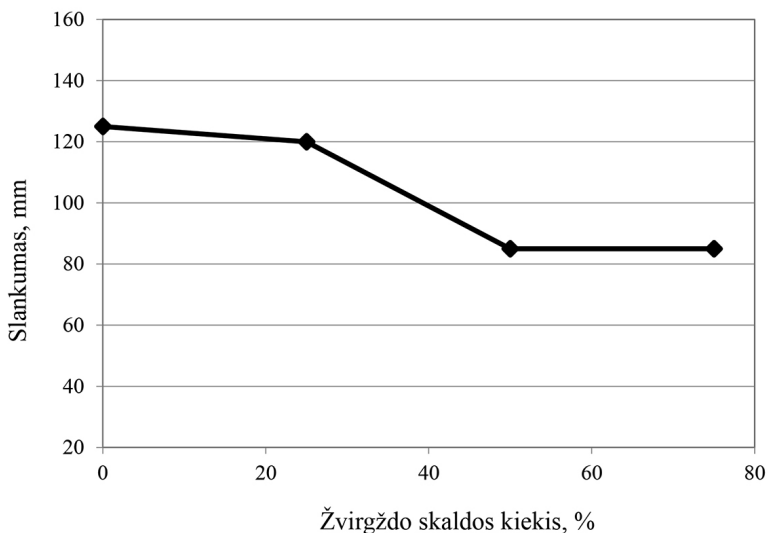
3.3.5. Hidrotechninio betono su žvirgždo skaldos stambiuoju užpildu atsparumo Baltijos jūros aplinkos poveikiui tyrimai

Buvo atlikti betono su skirtingu stambiuoju užpildu atsparumo BJA poveikiui tyrimai pagal anksčiau aprašytą bandymo metodiką (2.5.4 poskyris). Kaip didelio atsparumo šalčiui stambusis užpildas buvo naudota kelių frakcijų (2/8 ir 11/16) granitinė skalda.

Atliekant bandymą granitinės skaldos stambusis užpildas buvo keičiamas žvirgždo skalda 0 %, 25 %, 50 % ir 75 % pagal masę. Betono mišinių su skirtingais žvirgždo skaldos kiekiais technologinės savybės: mišinio slankumas, mišinio tankis ir įtraukto oro kiekis mišinyje, pateikti 3.58–3.60 paveiksluose.

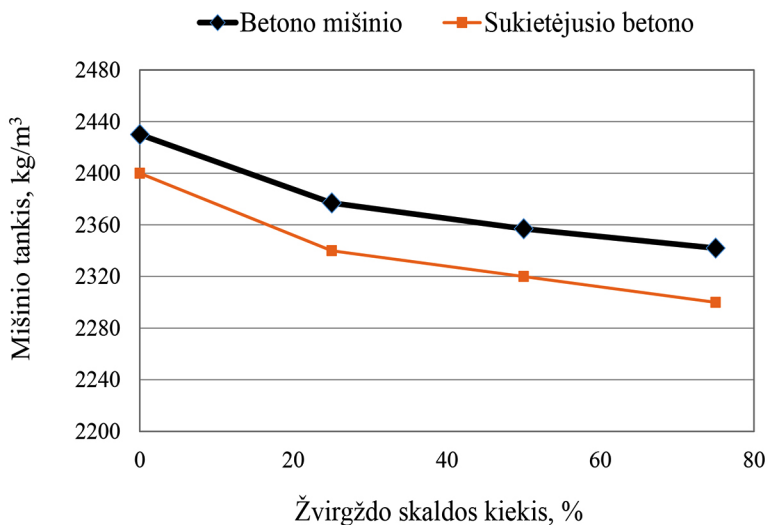
Gauti hidrotechninio betono mišinio su skirtingais žvirgždo skaldos kiekiais slankumo bandymo rezultatai rodo, kad, didinant žvirgždo skaldos kiekį betono mišinyje vietoje granito skaldos, betono mišinio slankumas nedaug mažėja nuo 124 iki 82 mm, kai žvirgždo skaldos kiekis padidėja nuo 0 % iki 75 %.

Didesnis betono mišinio slankumas su granitine skalda gaunamas dėl dviejų skirtingų frakcijų, kurių mišinys turi geresnę granuliometriją ir yra mažesnio tuštymėtumo.



3.58 pav. Hidrotechninio betono su skirtingu žvirgždo skaldos kiekiu betono mišinio slankumo bandymo rezultatai

Fig. 3.58. Hydrotechnical concrete with different crushed gravel content concrete mixture slump testing results

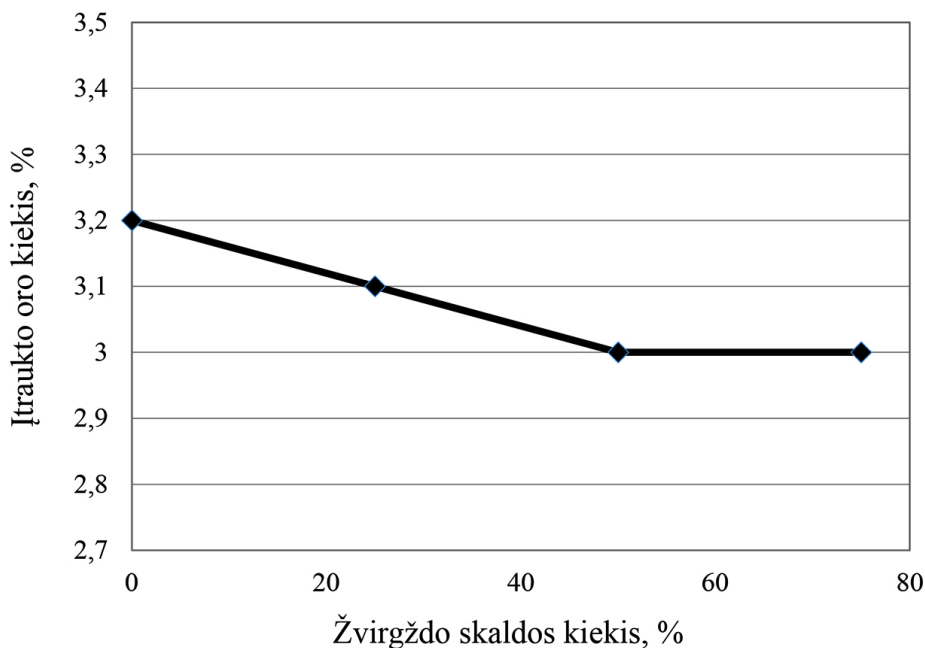


3.59 pav. Hidrotechninio betono su skirtingu žvirgždo skaldos kiekiu betono mišinio tankio bandymo rezultatai

Fig. 3.591. Hydrotechnical concrete with different crushed gravel content concrete mixture density testing results

Gauti hidrotechninio betono mišinio su skirtingu žvirgždo skaldos 0 %, 25 %, 50 % ir 75 % kiekiu rezultatai rodo, kad didėjant žvirgždo skaldos kiekiui, betono mišinio tankis nuo 2435 kg/m^3 iki 2330 kg/m^3 mažėja dėl tų pačių priežasčių kaip ir betono mišinio slankumas. Atitinkamai sukietėjusio betono tankis mažėja nuo 2400 kg/m^3 iki 2310 kg/m^3 žvirgždo skaldos kiekiui betone didėjant iki 75 %.

Hidrotechninio betono su skirtingu žvirgždo skaldos 0 %, 25 %, 50 % ir 75 % kiekiu bandymo rezultatai rodo, kad oro kiekis betono mišinyje išlieka panašus (mažėja nuo 3,2 iki 3,0 %) didėjant žvirgždo skaldos kiekiui betone iki 75 % (3.60 pav.).

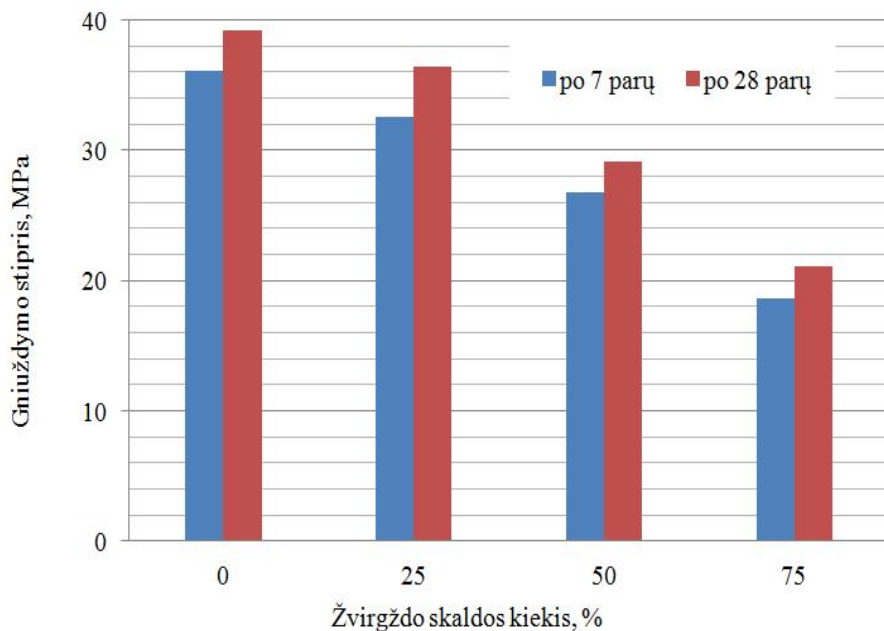


3.60 pav. Hidrotechninio betono su skirtingu žvirgždo skaldos kiekiu įtraukto oro kiekio bandymo rezultatai

Fig. 3.60. Hydrotechnical concrete with different crushed gravel content entrained air content testing results

Hidrotechninio betono su skirtingu žvirgždo skaldos 0 %, 25 %, 50 % ir 75 % kiekiu gniuždymo stipris pateiktas 3.61 paveiksle. Iš gautų rezultatų matyti, kad betono gniuždymo stipris tiek po 7 parų, tiek po 28 parų tolygiai mažėja nuo 36 iki $18,5 \text{ MPa}$ ir nuo 39 iki 21 MPa atitinkamai. Betono gniuždymo stiprio po 7 parų sumažėjimas, pakeičiant 75 % granito skaldos

žvirgždo skalda, siekia 47 %, o po 28 parų – 46 %. 3.61 paveiksle gniuždymo stiprio variacijos koeficientas kinta nuo 1,06 % iki 3,45 % po 7 kietėjimo parų, o po 28 kietėjimo – nuo 0,85 % iki 3,12 %.

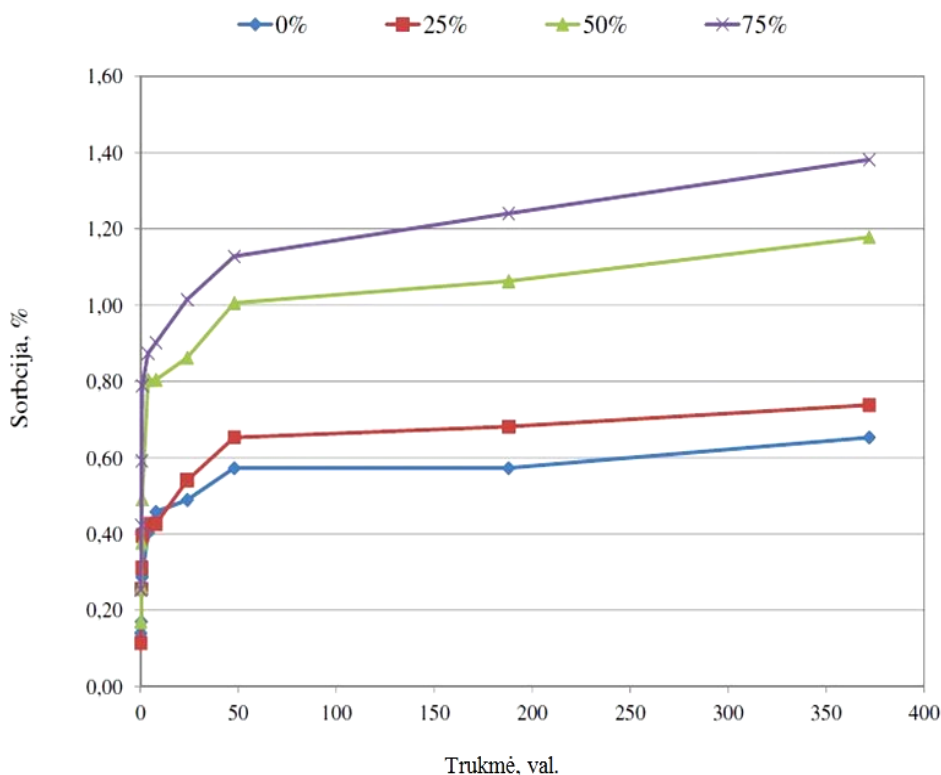


3.61 pav. Hidrotechninio betono su skirtingu žvirgždo skaldos kiekiu gniuždymo stiprio po 7 ir 28 parų kietėjimo bandymo rezultatai

Fig. 3.61. Hydrotechnical concrete with different crushed gravel content compressive strength after 7 and 28 days testing results

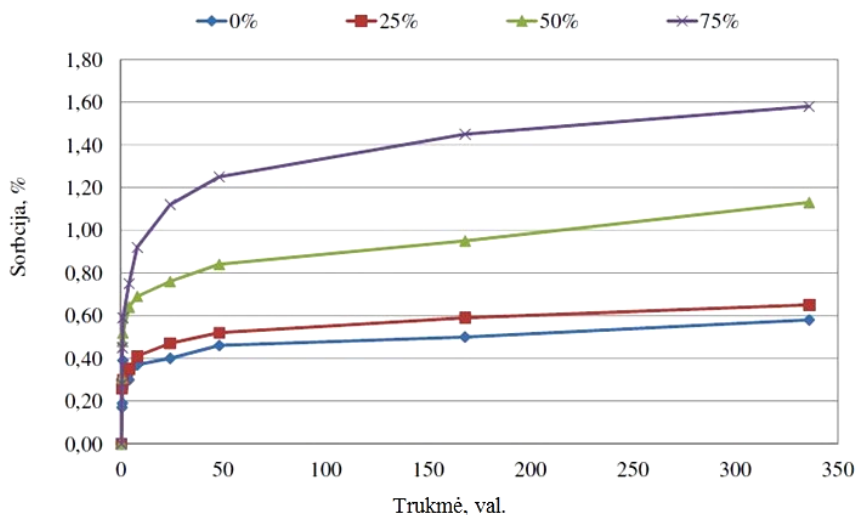
Hidrotechninio betono su skirtingu žvirgždo skaldos kiekiu: 0 %, 25 %, 50 % ir 75 % – sorbcijos bandymo, esant orasausės būklės, pagal 2.5.3 poskyryje pateiktą metodiką rezultatai pateikti 3.62 paveiksle. Iš 3.64 paveiksle pateiktų rezultatų matyti, kad, didėjant žvirgždo skaldos kiekiui, nuo 0 % iki 75 % vietoje granito skaldos, betono sorbcija labai padidėja nuo 0,62 iki 1,39 %. Minėtas jūros vandens cheminės sudėties tirpalo sorbcijos padidėjimas gali būti aiškinamas betono mišinio ir sukietėjusio betono tankio sumažėjimu bei stambiojo užpildo vandens įgėrio padidėjimu (žvirgždo skaldos – 1,3 %, o granito skaldos – 0,8 %). Analogiški rezultatai gauti bandant sauso betono sorbcines charakteristikas (3.65 pav.). Bandant sauso betono sorbcines charakteristikas, gautas betono sorbcijos padidėjimas nuo 0,64 iki 1,58 %, pakeičiant 75 % granito skaldos žvirgždo skalda. Minėtas betono sorbcijos, esant tiek orasausės, tiek sausos būklės, padidėjimas reiškia mažesnes betono ilgaamžiškumo charakteristikas naudojant jį Baltijos jūros aplinkoje.

Iš orasausių ir sausų hidrotechninio betono su skirtingais žvirgždo skaldos kiekiais 0 %, 25 %, 50 % ir 70 % sorbcijos tyrimų kreivių matyti, kad orasausiai ir sausi betono bandiniai sparčiausiai absorbuoja Baltijos jūros vandenį per pirmąsias dvi paras, tolimesnėmis laiko atkarpomis absorbcijos procesas sulėtėja. Mažos sorbcijos betono (iki 25 % žvirgždo skaldos vietoje granito skaldos) tolėsnė vandens adsorbcija beveik nevyksta, o didesnės sorbcijos betonams (50–75 % žvirgždo skaldos vietoje granito skaldos) pastebimas tolimesnis nežymus vandens adsorbcijos didėjimas 0,2–0,3 %.



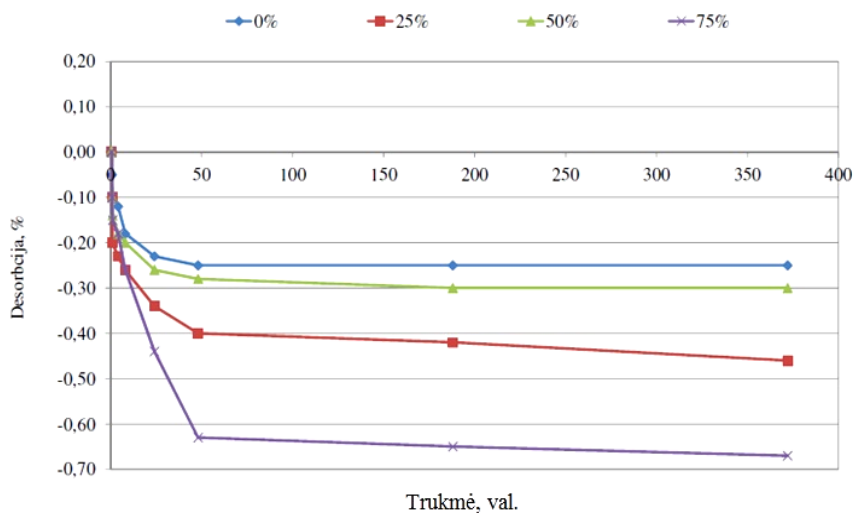
3.62 pav. Orasausio hidrotechninio betono su skirtingu žvirgždo skaldos kiekiu sorbcijos bandymų rezultatai

Fig. 3.62. Hydrotechnical concrete with different crushed gravel content in natural humidity conditions sorption testing results



3.63 pav. Sauso hidrotechninio betono su skirtingu žvirgždo skaldos kiekiu sorbcijos bandymų rezultatai

Fig. 3.63. Hydrotechnical concrete with different crushed gravel content in oven dried conditions sorption testing results



3.64 pav. Įmirkyto hidrotechninio betono su skirtingu žvirgždo skaldos kiekiu sorbcijos bandymų rezultatai

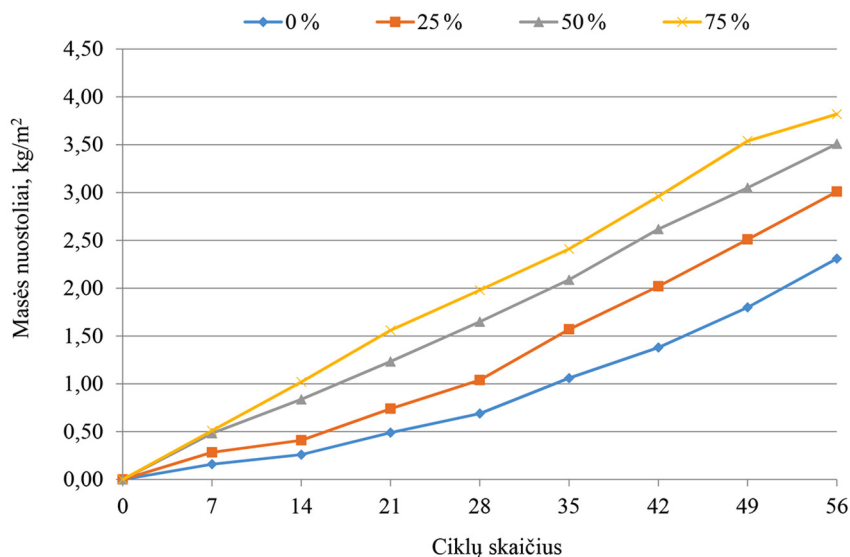
Fig. 3.64. Hydrotechnical concrete with different crushed gravel content in saturated conditions sorption testing results

Iš 3.63 paveiksle pateiktų įmirkytų betono bandinių su skirtingais žvirgždo skaldos kiekiais 0 %, 25 %, 50 % ir 70 % sorbcijos tyrimų kreivių, esant įmirkytos būklės, matyti, kad betono desorbcijos procesai didėja didėjant žvirgždo skaldos kiekiui betone vietoje granitinės skaldos. Bandiniai sparčiausiai desorbuoja Baltijos jūros vandenį per pirmąsias dvi paras, tolimesnėmis laiko atkarpomis desorbcijos procesas sulėtėja ir beveik sustoja.

Vertinant betono su skirtingu žvirgždo skaldos kiekiu sorbcijos parametrus, galima daryti išvadą, kad kaip stambusis užpildas žvirgždo skalda nėra tinkama, nes paspartina sorbcijos ir desorbcijos procesus hidrotechniniame betone ir sumažina tokio betono ilgaamžiškumą jūros aplinkos sąlygomis.

Hidrotechninio betono su skirtingu žvirgždo skaldos kiekiu atsparumo BJA poveikiui pagal 2.5.4 poskyryje aprašytą bandymo metodiką bandymo rezultatai pateikti 3.64 paveiksle.

Iš 3.65 paveiksle pateiktų hidrotechninio betono su skirtingais žvirgždo skaldos 0 %, 25 %, 50 % ir 75 % kiekiais atsparumo BJA poveikiui bandymo rezultatų matyti, kad masės nuostoliai nuo bandomojo paviršiaus tolygiai didėja didėjant žvirgždo skaldos kiekiui betone. Skirtingai negu betonuose su skirtingais mineralinio priedo kiekiais cemento, betonuose su skirtingais stambiaisiais užpildais skirtumai tarp masės nuostolių išryškėja jau po 28 bandymo ciklą ir toliau vykdant bandymą beveik nesikeičia.

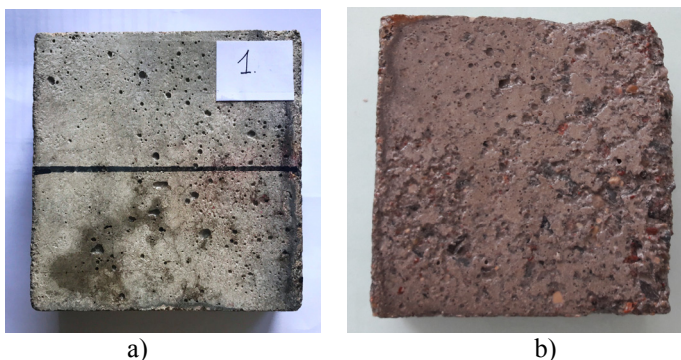


3.65 pav. Hidrotechninio betono su skirtingu žvirgždo skaldos kiekiu atsparumo Baltijos jūros aplinkos poveikiui bandymo rezultatai

Fig. 3.65. Hydrotechnical concrete with different contents of crushed gravel contents resistance to the Baltic sea environment testing results

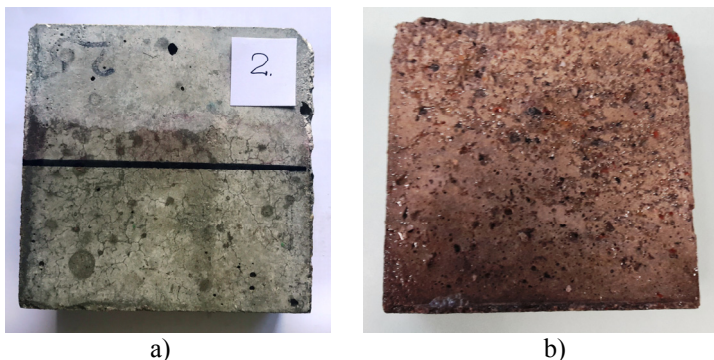
3.65 paveiksle pateiktų bandinių standartinis nuokrypis nuo $0,01 \text{ kg/m}^2$ siekė iki $0,09 \text{ kg/m}^2$, variacijos koeficientas nuo 0,2 % iki 2,5 %. Galima daryti išvadą, kad dėl blogesnių sorbcinių charakteristikų žvirgždo skalda turi neigiamą poveikį hidrotechninio betono naudojamo jūros aplinkoje ilgaamžiškumui.

Iš pateiktų bandymo rezultatų matome gana didelius betono su dideliu žvirgždo skaldos kiekiu irimo požymius, t. y. šaldymo terpė, veikiant užšaldymo ir atšildymo ciklams, betono paviršių suardė iki stambiųjų užpildų (3.66–3.69 paveikslai).



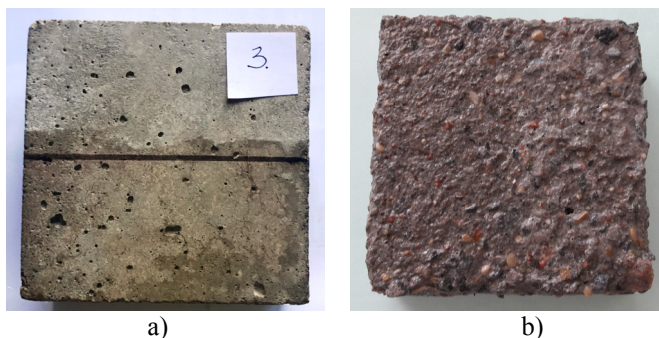
3.66 pav. Hidrotechninio betono be žvirgždo skaldos stambiojo užpildo bandomojo paviršiaus vaizdas: a) prieš bandymą; b) po 56 bandymo ciklų

Fig. 3.66. Testing surface view of hydrotechnical concrete without crushed gravel: a) coarse aggregate before; b) 56 testing cycles



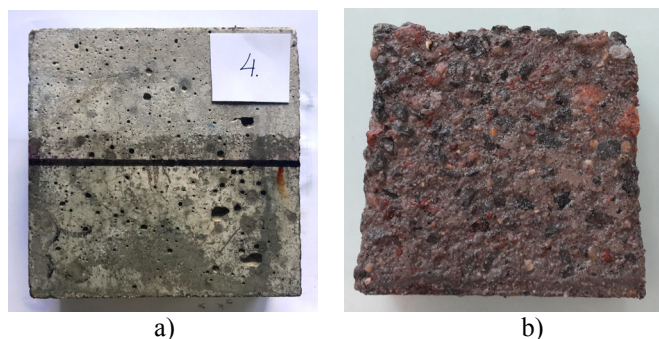
3.67 pav. Hidrotechninio betono su 25 % žvirgždo skaldos stambiojo užpildo bandomojo paviršiaus vaizdas: a) prieš bandymą; b) po 56 bandymo ciklų

Fig. 3.67. Testing surface view of hydrotechnical concrete with 25% of crushed gravel: a) coarse aggregate before; b) after 56 testing cycles



3.68 pav. Hidrotechninio betono su 50 % žvirgždo skaldos stambiojo užpildo bandomojo paviršiaus vaizdas: a) prieš bandymą; b) po 56 bandymo ciklų

Fig. 3.68. Testing surface view of hydrotechnical concrete with 50% of crushed gravel: a) coarse aggregate before; b) after 56 testing cycles



3.69 pav. Hidrotechninio betono su 75 % žvirgždo skaldos stambiojo užpildo bandomojo paviršiaus vaizdas: a) prieš bandymą; b) po 56 bandymo ciklų

Fig. 3.69. Testing surface view of hydrotechnical concrete with 75% of crushed gravel: a) coarse aggregate before; b) after 56 testing cycles

3.66–3.69 paveiksluose pateikti betono su skirtingais žvirgždo skaldos kiekiais bandinių paviršiaus vaizdai po atsparumo BJA poveikiui bandymo 56 ciklų. Kaip matome iš minėtų paveikslų, bandinių su skirtingais žvirgždo skaldos kiekiais betone paviršiaus vaizdas po bandymo yra skirtingas. Bandiniuose be žvirgždo skaldos (3.66 pav.) paviršiaus defektų, t. y. cemento akmenų atskilinėjimų, yra mažiausiai.

3.66 paveiksle, kuriame pateiktas betono be žvirgždo skaldos stambiojo užpildo paviršiaus vaizdas, matome nedidelius betono paviršiaus irimo požymius, esančius nevisame plote ir nedideliame gylyje. Gilesnių irimo procesų nepasireiškia.

3.67 paveiksle pateiktas betono su 25 % žvirgždo skaldos paviršiaus vaizdas, kuriame pastebimo žymesni betono paviršiaus irimo požymiai, esantys visame bandomojo paviršiaus plote ir didesniame gylyje, lyginant su pirmuoju bandiniu, pateiktu 3.69 paveiksle. Gilesnių irimo procesų šiuo atveju nepasireiškia.

3.68 paveiksle, kuriame pateiktas betono su 50 % žvirgždo skaldos paviršiaus vaizdas, matome betono irimo požymius, pasireiškiančius gilesniame betono sluoksnyje visame bandomojo paviršiaus plote. Didesniame bandomojo paviršiaus plote cemento akmuo nuiręs iki stambiojo užpildo paviršiaus.

3.69 paveiksle, kuriame pateiktas betono su 70 % žvirgždo skaldos paviršiaus vaizdas, matome intensyvių betono irimo požymius visame bandomojo paviršiaus plote ir dideliame gylyje. Nuiręs storas cemento akmens kartu ir kai kuriais užpildais kiekis visame bandomojo paviršiaus plote.

Iš pateiktų tyrimų rezultatų ir vaizdinės medžiagos galima daryti išvadą, kad granito skaldos stambiojo užpildo pakeitimas žvirgždo skalda sumažina betono atsparumą BJA poveikiui ir nėra tinkamas tokioje aplinkoje naudojamiems betonams.

3.3.6. Hidrotechninio betono, modifikuoto mineraliniais priedais, chloridų difuzijos tyrimai

Chloridų difuzija nustatyta pagal NORDTEST NT492 metodiką, aprašytą 2.5.5 poskyryje. Iš gautų bandymo rezultatų apskaičiuotas betonų su skirtingais mineraliniais (aukštakrosnių šlako, lakiųjų pelenų ir SiO_2 mikrodulkių) priedais chloridų difuzijos koeficientas. Chloridų difuzijos betone bandymų rezultatai priklausomai nuo mineralinio priedo tipo ir kiekio pateikti 3.70–3.71 paveiksle.

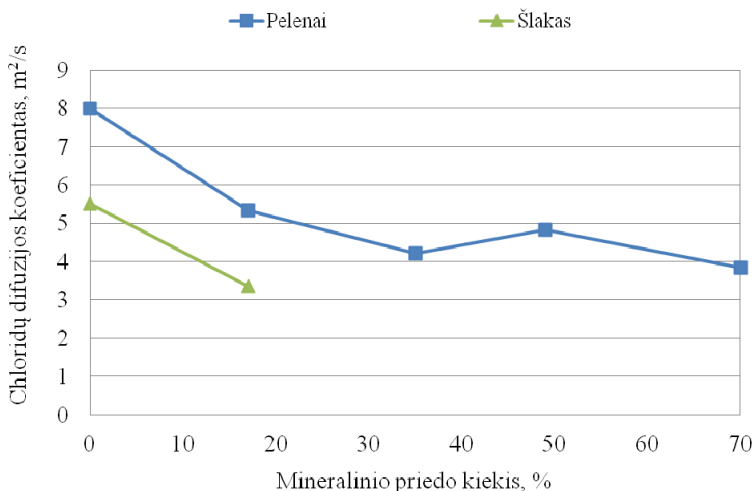
Mokslininkai teigia, kad armuotosios konstrukcijos, eksploatuojamos jūros aplinkoje ir jos veikiamos, ilgaamžiškumas mažėja, didėjant ištirpusio chlorido kiekiui betono porų tirpale (Xiao-mei Wan *et al.* 2013). Todėl galime daryti prielaidą, kad Baltijos jūros vandens druskingumas, chloridų kiekis jame turi neigiamą įtaką hidrotechninio betono ilgaamžiškumui. Didelę įtaką chloridų skverbtis turi plieniniams armatūros strypams, kurie yra gelžbetonyje. Betone su plienine armatūra priklausomai nuo aplink metalą esančio vandeninio tirpalo druskingumo vyksta elektrocheminės korozijos reakcijos. Vykstant šioms reakcijoms armatūrinis plienas palaipsniui praranda masę, jo skerspjūvis mažėja (Aperador *et al.* 2009). Minėtos reakcijos betono ir metalo paviršiuje laikui bėgant sukelia armatūros korozijos procesus, dar vėliau pačio betono irimą. Viena dažniausiai pasitaikančių hidrotechninio betono, naudojamo jūros aplinkoje, paviršiaus irimo priežasčių yra chloridų prasiskverbimas per betono poras.

Betono paviršiaus defektai, atsirandantys dėl armatūros korozijos, stebimi ir Klaipėdos jūrų uoste esančiose betoninėse krantinėse ar kitose hidrotechnikos statinių konstrukcijose. Šie defektai aprašyti 3.1.1 poskyryje.

Betonų su skirtingais aukštakrosnių šlako bei lakiųjų pelenų kiekiais chloridų difuzijos koeficiento bandymų rezultatai pateikti 3.70 paveiksle. Kaip matome iš 3.70 paveiksle pateiktų rezultatų, betono chloridų difuzijos koeficientą betone labai sumažina aktyvūs mineraliniai priedai – granuliuotas aukštakrosnių šlakas ir lakieji pelenai. Didėjant lakiųjų pelenų kiekiui ir granuliuoto aukštakrosnių šlako iki 35 % arba 17 % atitinkamai, chloridų difuzijos koeficientas sumažėja nuo 8 iki 4,1 m^2/s , t. y. 49 %, ir nuo 5,5 iki 3,5 m^2/s , t. y. 36 % atitinkamai. Tolimesnis lakiųjų pelenų kiekio didinimas nemažina chloridų difuzijos koeficiento ir nėra racionalus.

Intensyvus chloridų prasiskverbimas sukelia plieno (armatūros) koroziją. Chloridų skverbimąsi lemia ir cemento tipo parinkimas, V/C santykis. Paprastai chloridų skverbimosi intensyvumas priklauso nuo chloridų difuzijos koeficiento, kuris skiriasi nuo poveikio trukmės (Roa-Rodriguez *et al.* 2013).

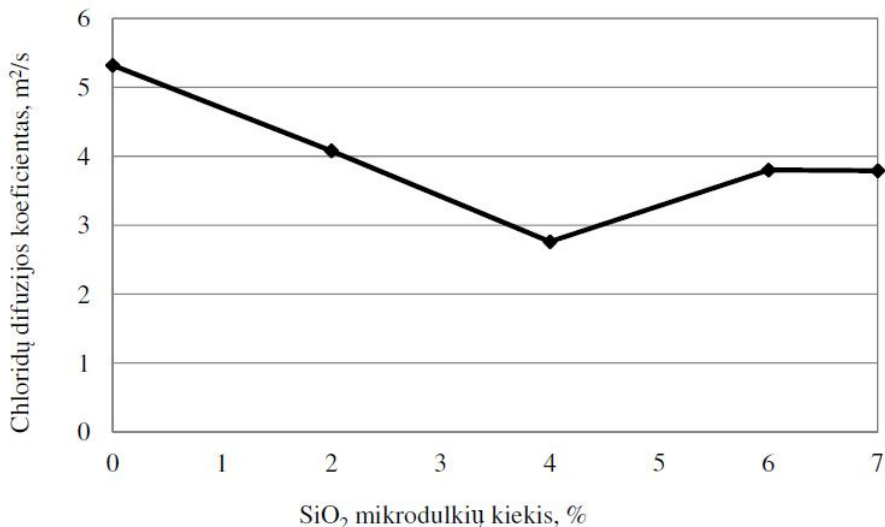
Gauti rezultatai rodo, kad lakiųjų pelenų ir granuliuoto aukštakrosnių šlako priedai betone turi teigiamą įtaką chloridų difuzijos koeficiento sumažinimui ir armatūros korozijos prevencijai hidrotechnikos konstrukcijoms naudojamame betone. Iš pateiktų lakiųjų pelenų ir granuliuoto aukštakrosnių šlako priedo betone bandymų rezultatų galima teigti, kad panašiu poveikiu kaip lakieji pelenai pasižymi ir granuliuoto aukštakrosnių šlako priedas. Lakieji pelenai ir granuliuotas aukštakrosnių šlakas veikia kaip pucolaninis priedas, uždarantis atviras kapiliarines poras betone, todėl jis chloridų skverbti betone iš esmės mažina.



3.70 pav. Hidrotechninio betono su lakiųjų pelenų ir granuliuoto aukštakrosnių šlako priedais chloridų difuzijos bandymo rezultatai

Fig. 3.70. Hydrotechnical concrete with fly ash and blast furnace slag additives chloride diffusion testing results

Papildomas SiO_2 mikrodulkių kiekis iki 4 % su 17 % lakiųjų pelenų priedu betone mažina chloridų difuzijos koeficientą nuo 5,3 iki 2,8 m^2/s , t. y. 47 %. Didesni SiO_2 mikrodulkių kiekiai netgi šiek tiek padidina chloridų difuzijos koeficientą betone. Todėl papildomas SiO_2 mikrodulkių kiekis su kitais mineraliniais priedais iki 4 % teigiamai veikia hidrotechniniame betone armatūros apsaugos nuo korozijos požįūriu (3.71 pav.).



3.71 pav. Hidrotechninio betono su 17 % lakiųjų pelenų ir skirtingu SiO_2 mikrodulkių priedu chloridų difuzijos bandymo rezultatai

Fig. 3.71. Hydrotechnical concrete with 17% of fly ash and different silica fume (SiO_2) content chloride diffusion testing results

Betono sorbcijos bandymų rezultatai leidžia prognozuoti chloridų difuzijos koeficientą kartu ir armuotojo betono atsparumo jūros aplinkos poveikiui dydį. Chloridų prasiskverbimas į hidrotechninį betoną paspartina armatūros koroziją, tačiau, kartu veikiant temperatūros pokyčiams (iš neigiamos perėjimas į teigiamą), gaunamas kenksmingiausias chloridų poveikis hidrotechniniam betonui. Kitų mokslininkų atliktais bandymais nustatyta, kad chloridų difuzijos greitis taip pat priklauso nuo betono tankio ir V/C santykio (Michael T, 1999; Skominas, R. 2008, Trocónis de Rincón, O., Castro, P. E. I. Moreno, Torres-Acosta, A. A., Morón de Bravo O., Arrieta I., García C., García, D., Martínez Madrid, M. 2004).

Darbe atlikti chloridų difuzijos rezultatai parodė, kad didėjantis lakiųjų pelenų ir granuliuoto aukštakrosnių šlako priedo kiekis betono mišinyje mažina

chloridų difuzijos dydį. Vadinas, galima daryti išvadą, kad minėtų mineralinių priedų kiekis betono mišinyje mažina chloridų difuzijos greitį ir gylį, mažindamas hidrotechnikos statinių gelžbetoninės konstrukcijos ir ją sudarančio betono bei jame esančios armatūros koroziją.

3.4. Betono atsparumo Baltijos jūros aplinkos poveikiui bandymo metodika

Betono atsparumo Baltijos jūros aplinkos poveikiui bandymo metodas (pateiktas disertacijos A priede) sukurtas norint kompleksiškai vertinti betono atsparumą šalčiui, druskų tirpalų poveikiui bei cheminiam druskų tirpalų poveikiui. Šis bandymo metodas neatkuria hidrotechninio betono eksploatacijos sąlygų Baltijos jūroje arba jos pakrantėje, tačiau įvertina pagrindinius tokiomis eksploatacijos sąlygomis atsirandančius betoną ardančius veiksnus. Reikalavimai betono atsparumui Baltijos jūros aplinkos sąlygoms turi būti taikomi hidrotechnikos statinių gelžbetoninių konstrukcijų projektavimui. Toks betono atsparumo Baltijos jūros aplinkos poveikiui bandymo metodas gali netikti sprendžiant, ar betono atsparumas yra pakankamas tam tikru specifiniu atveju, bet gali būti taikomas lyginant skirtingų betonų atsparumą standartinėms aplinkos poveikio sąlygoms.

Hidrotechninio betono atsparumas aplinkos poveikiui turi būti vertinamas dviejų skirtingų atsirandančių pažaidų tipų analize: atskilinėjimo (paviršiaus defektų) ir vidinės struktūrinės pažaidos (tūrinio irimo). Ši bandymo metodika taikoma tik betono atsparumo atskilinėjimui, t. y. paviršinio irimo vertinimui.

3.5. Trečiojo skyriaus išvados

1. Svarbiausi veiksniai, darantys įtaką hidrotechninio betono, naudojamo BJA, irimo intensyvumui, yra: klimato sąlygos (temperatūra, drėgmė ir kt.); betono sorbcijos ir desorbcijos parametrai, lemiantys betono drėgnumą; užšalimo ir atšildymo ciklų poveikis; druskų tirpalų (chloridų) difuzijos procesai, sukeliantys armatūros koroziją, ir mechaniniai poveikiai.
2. Atlikus Klaipėdos uosto hidrotechnikos statinių vizualinę apžiūrą, nustatyti betono paviršiaus defektai, atsirandantys dėl BJA poveikio – cemento akmens nutrupėjimai ir armatūros korozija bei laivų švartavimosi mechaninių poveikių sukelti paviršiniai defektai.
3. Ilgą laiką (daugiau nei 20 metų) BJA naudojamo betono gniuždymo stipris nesumažėja ir siekia 55 MPa, kai projektinis betono stipris siekia 40–45 MPa.

4. Klaipėdos jūrų uosto akvatorijos vandenyje vyrauja Na^+ ir Mg^{2+} katijonai bei Cl^- ir SO_4^{2-} anijonai. Na^+ jonų kiekis siekia iki 230 mg/l, Mg^{2+} – 180 mg/l, anijonų: Cl^- – 1580 mg/l, SO_4^{2-} – 870 mg/l. Vandenyje tirpių sulfatų kiekis viršija 600 mg/l, todėl tokia aplinka vertinama kaip vidutinio cheminio agresyvumo ir gali sukelti sulfatinę betono koroziją.
5. BJA naudojamo hidrotechninio betono porų skystoje terpėje vyrauja K^+ , Na^+ katijonai ir Cl^- ir SO_4^{2-} anijonai – sulfatai ir chloridai. Sulfatų kiekis siekia iki 2400 mg/kg, o chloridų – 1640 mg/kg, kalio – 2900 mg/kg, natrio – daugiau nei 1400 mg/kg, kurie sukelia armatūros koroziją gelžbetoninėse konstrukcijose.
6. Cementinio akmens ilgaamžiškumo tyrimų rezultatai parodė, kad Baltijos jūros vandens poveikiui atspariausi cementai su kompleksiniu mineraliniu priedu, sudarytu iš 17–70 % granuliuoto aukštakrosnių šlako ir 5 % SiO_2 mikrodulkių.
7. Portlandcemenčio pakeitimas granuliuoto aukštakrosnių šlako priedu betone iki 70 % (maišant skirtingų tipų cementus) mažina betono mišinio slankumą apie 100 mm, lakiųjų pelenų priedu iki 70 % – apie 170 mm, o SiO_2 mikrodulkėmis iki 7 % – apie 80 mm.
8. Portlandcemenčio pakeitimas granuliuoto aukštakrosnių šlako priedu betone iki 70 % (maišant skirtingų tipų cementus) mažina oro kiekį betono mišinyje apie 2,5 %, lakiųjų pelenų priedu – mažai keičia oro kiekį, SiO_2 mikrodulkėmis – didina oro kiekį betono mišinyje.
9. Portlandcemenčio pakeitimas granuliuoto aukštakrosnių šlako priedu iki 70 % (maišant skirtingų tipų cementus) sumažina betono gniuždymo stiprį po 28 parų apie 10 %, lakiųjų pelenų priedu iki 70 % – apie 23 %, o SiO_2 mikrodulkėmis iki 2 % – padidina betono stiprį, o su 7 % SiO_2 mikrodulkių – betono stiprį sumažina 8 %.
10. Betonai su granuliuoto aukštakrosnių šlako priedu nuo 17 % iki 49 %, pakeičiančiu dalį portlandcemenčio (maišant skirtingų tipų cementus), pasižymi 43–53 % mažesne sorbcija. Betonai su 17 % ir 35 % granuliuoto aukštakrosnių šlako cemento pakaitalu absorbuoja mažiausiai Baltijos jūros cheminės sudėties druskos tirpalo, o su 70 % granuliuoto aukštakrosnių šlako priedu absorbuoja panašiai kaip su cementu be mineralinio priedo.
11. Iš betono sorbcijos ir desorbcijos parametrų galima spręsti apie betono, naudojamo Baltijos jūros aplinkoje, ilgaamžiškumą. Betono sorbcijos ir desorbcijos bei masės nuostolių atsparumo BJA poveikiui tyrimų rezultatai rodo, kad tokioje aplinkoje naudojamo betono sorbcijos dydis turi neviršyti 0,8 % po dviejų savaitių bandymo trukmės.
12. Betono su granuliuoto aukštakrosnių šlako priedo iki 35 % turinčiu cementu (maišant skirtingų tipų cementus) masės nuostoliai po kapiliarinio įmirkio jūros vandens cheminės sudėties druskos tirpale ir užšaldymo ir atšildymo

- ciklų mažėja apie 13 %, o su didesniu granuliuoto aukštakrosnių šlako kiekiu – didėja ir, kai granuliuoto aukštakrosnių šlako pakaitalas siekia 70 %, dvigubai viršija betono be priedo masės nuostolius. Betono su lakiųjų pelenų priedu masės nuostoliai nuolat didėja didėjant lakiųjų pelenų pakaitalui ir su 70 % lakiųjų pelenų viršija apie 5 kartus betono be priedo masės nuostolius.
13. Betonas su klinties priedo turinčiu cementu pasižymi didžiausiais masės nuostoliais po užšaldymo ir atšildymo ciklų įmirkius betoną jūros vandens cheminės sudėties druskų tirpale ir daugiau negu dvigubai padidina masės nuostolius lyginant su betonu be priedo.
 14. Granitinės skaldos stambiojo užpildo dalinis pakeitimas žvirgždo skalda didina masės nuostolius po užšaldymo ir atšildymo ciklų: 25 % žvirgždo skaldos – apie 30 %, 50 % žvirgždo skaldos – 52 %, o 75 % žvirgždo skaldos – 65 % dėl žytaus (iki 172 %) cemento akmens kapiliarinio poringumo (sorbcijos) padidėjimo.
 15. Lakiųjų pelenų ir granuliuoto aukštakrosnių šlako mineraliniai priedai stabdo chloridų difuziją betone. Lakiųjų pelenų pakaitalas iki 35 % sumažina chloridų difuzijos koeficientą apie 47 %, o didesnis mineralinio priedo kiekis mažai keičia chloridų difuzijos koeficientą. Kompleksinis iki 4 % SiO_2 mikrodulkių ir 17 % lakiųjų pelenų pakaitalas sumažina chloridų difuzijos koeficientą dar 48 %, didesni SiO_2 mikrodulkių kiekiai – didina chloridų difuzijos koeficientą.
 16. Šaldymo terpė turi įtakos betono ilgaamžiškumo bandymų rezultatams. Ilgaamžiškumo bandymuose naudojant vietoje gėlo vandens Baltijos jūros vandens cheminės sudėties druskų tirpalą, masės nuostoliai gaunami apie 20 kartų didesni, o naudojant 3 % NaCl druskos tirpalą – apie 90 kartų didesni.

Bendrosios išvados

1. Eksploatacijos Baltijos jūros aplinkoje betono gniuždymo stipris didėja ir jame nepasireiškia tūrinio irimo požymiai. Klaipėdos jūrų uosto gelžbetoninėse konstrukcijose vyrauja betono paviršiaus defektai, atsiradę dėl aplinkos poveikio ir laivų švartavimosi sukeltų mechaninių poveikių bei armatūros korozijos sukeltų defektų.
2. Baltijos jūros aplinkoje naudojamo betono ilgaamžiškumas turi būti vertinamas pagal specialią bandymo metodiką – masės nuostolių nuo betono paviršiaus nustatymą po užšaldymo ir atšildymo ciklų, įmirkant betoną Baltijos jūros vandens cheminės sudėties tirpale kapiliarinio įgėrio būdu. Pagal minėtus betono ilgaamžiškumo vertinimo principus sukurta betono atsparumo Baltijos jūros aplinkos poveikiui bandymo metodika.
3. Betono atsparumą Baltijos jūros aplinkos poveikiui galima prognozuoti pagal betono sorbcijos ir desorbcijos parametrus. Tokioje aplinkoje naudojamo betono sorbcijos dydis turi neviršyti 0,8 % po dviejų savaitių bandymo trukmės.
4. Portlandcemenčio pakaitalas iki 35 % nuo cemento masės aukštakrosnių šlaku sumažina betono sorbciją, masės nuostolius po cikliško užšaldymo ir atšildymo įmirkius jūros vandens cheminės sudėties tirpale ir padidina betono atsparumą Baltijos jūros aplinkos sąlygoms dėl cemento akmens kapiliarinio poringumo (sorbcijos) sumažėjimo. Didesni aukštakrosnių šlako kiekiai mažina betono atsparumą Baltijos jūros aplinkos sąlygoms.

5. Portlandcemenčio pakaitalas nuo 17 % iki 70 % lakiaisiais pelenais padidina betono sorbciją, masės nuostolius po cikliško užšaldymo ir atšildymo įmirkius jūros vandens cheminės sudėties tirpale ir sumažina betono atsparumą Baltijos jūros aplinkos sąlygoms dėl cemento akmens kapiliarinio poringumo (sorbcijos) padidėjimo.
6. Portlandcemenčio pakaitalas iki 35 % lakiaisiais pelenais ir aukštakrosnių šlaku 47 % sumažina chloridų difuzijos koeficientą betone ir stabdo armatūros koroziją gelžbetoninėse konstrukcijose eksploatuojamose Baltijos jūros aplinkos sąlygomis dėl cemento akmens kapiliarinio poringumo (sorbcijos) sumažėjimo, sureagavus mineraliniame priede esančiam amorfiniam SiO_2 su Ca(OH)_2 , susidariusiu cemento hidratacijos metu.
7. Portlandcemenčio pakaitalas SiO_2 mikrodulkėmis iki 2 % nuo cemento masės padidina betono stiprį ir 38 % sumažina masės nuostolius po užšaldymo ir atšildymo ciklą dėl cemento akmens kapiliarinio poringumo (sorbcijos) sumažėjimo 27 %. Portlandcemenčio pakaitalas SiO_2 mikrodulkėmis iki 6 % išlaiko tą patį betono stiprį, vidutiniškai 42 % padidina masės nuostolius ir sumažina betono atsparumą Baltijos jūros aplinkos poveikiui.
8. Granitinės skaldos stambiojo užpildo dalinis pakeitimas žvirgždo skalda mažina betono atsparumą Baltijos jūros aplinkos poveikiui – didina masės nuostolius po užšaldymo ir atšildymo ciklą: 25 % žvirgždo skaldos – apie 30 %, 50 % žvirgždo skaldos – apie 52 %, o 75% žvirgždo skaldos – apie 65 % dėl didelio (iki 172 %) cementinio akmens kapiliarinio poringumo (sorbcijos) padidėjimo.
9. Kapiliarinio poringumo sumažinimui ir sorbcinių charakteristikų optimizavimui Baltijos jūros aplinkoje naudojamam betonui gaminti rekomenduojamas sudėtinis portlandcementis su 30–35 % šlako priedu ir 2 % SiO_2 mikrodulkių priedu. Hidrotechninio betono paviršiaus defektams išvengti tokio betono gamybai turi būti naudojamas atsparus šalčiui granito skaldos stambus užpildas.

Literatūra ir šaltiniai

Ahcene Merida; Fattoum Kharchi. 2015. Pozzolan Concrete Durability on Sulphate Attack. *Procedia Engineering* 114: 832–837.

Alhozaimy A.; AL-Negheimish A.; Alawad O.A.; Jaafer M.S.; Noorzai J. 2012. Binary and Ternary effects of ground dune sand and blast furnace slag on the compressive strength of mortar. *Cement and Concrete composite* 34:734–738.

Ahcene Merida, Fattoum Kharchi. 2015. Pozzolan Concrete Durability on Sulphate Attack. *Procedia Engineering* 114: 832–837.

Amini B.; Tehrani S. 2015. Combined Effects of Saltwater and Water Flow on Deterioration of Concrete under Freeze–Thaw Cycles. *Journal of Cold Regions Engineering* (28)4:121–161.

Aperador W.; Vargas A. and Betancur J. 2013. Respuesta electroquímica de aleaciones fermanal. expand. ed. Academica Espanola. *Materials Research* 16(2):447–452.

Aperador W.; Mejía de Gutiérrez R.; Bastidas D.M.. Corrosion Science. 2009. 2027 p.

Basheer L.; Cleland D. J. 2006. Freeze–thaw resistance of concrete treated with pore liners. *Construction Building Materials* 20(10):990–998.

Bukantis A. Lietuvos klimatas. Vilnius: VU leidykla. 1994. 188 p.

Bukantis A. ir kt. 2007. Klimato kaita: prisitaikymas prie jos poveikio Lietuvos pajūryje. Vilnius: VU leidykla. 188 p.

Bukantis, A.; Stankūnavičius G.; Valiuškevičienė L. 2000. Air temperature anomalies in Lithuania. *Annales Geographicae* (33):73–80.

Bukantis, A.; Bartkevičiene, G. 2008. Thermal Effects of the North Atlantic Oscillation on the Cold Period of the Year in Lithuania. *Climate Research* 28(1):221–228.

Bukantis, A.; Paulauskaitė, S. 2001. Oro temperatūros kaitos metinio ciklo ypatybės Klaipėdoje ir jos lemiančios atmosferos cirkuliacijos formos. *Geografijos metraštis* 34(2):5–14.

Bukantis, A.; Valiuškevičienė, L. 2005. Ekstremalių oro temperatūros ir kritulių kaita bei juos lemiantys veiksniai Lietuvoje XX amžiuje. *Geografijos metraštis* 38(1):5–17.

Bajerčiūtė, A.; Pupienis, D. 2011. Baltijos jūros centrinės dalies vandens temperatūros ir druskingumo kaita 1960–2009 m. *Geografija* 47 (2):107–116.

Bajerčiūtė, A.; Pupienis, D.; Stankūnavičius, G. 2011. Baltijos jūros centrinės dalies vandens paviršiaus temperatūros ir druskingumo kaita 1971–2009 m. *Jūros ir krantų tyrimai – 2011. Konferencijos medžiaga* (1):35–40.

Baltijos jūros ir Kuršių marių aplinkos monitoringo ataskaita. 2007. Jūrinių tyrimų centras. Ataskaita, 151 p.

Baltijos jūros ir Kuršių marių aplinkos monitoringo ataskaitos. Jūrinių tyrimų centras. Ataskaita, 2008. p 112.

Baltijos jūros ir Kuršių marių aplinkos monitoringo ataskaita. Jūrinių tyrimų centras. Ataskaita, 2009. p 87.

Baltijos jūros ir Kuršių marių aplinkos monitoringo ataskaita. Jūrinių tyrimų centras. Ataskaita, 2010. p 96.

Baltijos jūros ir Kuršių marių aplinkos monitoringo ataskaitos. Jūrinių tyrimų centras. Ataskaitos, 2011. p 67.

Boulder Canyon Project Report. 1995. *Thermal properties of concrete*. Final Report by USBR, Part VII, India: (1):162–166.

Bilodeau, A.; Malhotra V.M. 2000. High-volume fly ash system: concrete solution for sustainable development. *ACI Material* 97(1):41–48.

Bonavetti, V.; Donza, H.; Menendez, G.; Cabrera, O.; Irassar, E. F. 2003. Limestone filler cement in low W/C concrete: A rational use of energy. *Cement and Concrete Research*, (33): 865–871.

Bijen, J. 2003. *Durability of engineering structures: design, repair and maintenance*. CRC, 262 p.

Bajaj, K.; Shrivastava, Y. 2012. Performance of Fly Ash and High Volume Fly Ash Concrete in Pavement Design. (28):188–192.

Browne, R. D. 1998. Mechanisms of corrosion of steel in concrete in relation to design, inspection, and repair of offshore and coastal structures. *Proceedings of the International Conference on Performance of Concrete in Marine Environment*, (1):169–203.

Cai, H.; Liu, X. 1998. Freeze-thaw durability of concrete: ice formation process in pores. *Cement and concrete research*, 28 (9):1281–1287.

Campbell-Allen, D.; Roper, H. 1991. *Concrete structures: materials, maintenance and repair*. Longman scientific and technical. 369 p.

Cao, J.; Chung, D. D. L. 2002. Damage evolution during freeze-thaw cycling of cement mortar, studied by electrical resistivity measurement. *Cement and concrete research*, 32 (10):1657–1661.

Chatterji, S. 1999. Aspects of the freezing process in a porous material-water system: Part 1. Freezing and the properties of water and ice. *Cement and concrete research*, 29, (4):627–630.

Chatterji, S. Aspects of the freezing process in a porous material-water system: Part 2: Freezing and the properties of porous materials. *Cement and concrete research*, 29 (5):781–784.

Chotard, T.; Gimet-Breart, N.; Smith, A. 2001. Application of ultrasonic testing to describe the hydration of calcium aluminat cement at the early age. *Cement and Concrete Research Journal*, (30):405–412.

Chrisholm, D. H.; Lee, N. P. 2000. *Durability Prediction for Coastal Reinforced Concrete Structures – Matching Reality and Theory*. 134–151 p.

Copuroglu, O. 2006. *The characterisation, improvement and modelling aspects of frost saltscaling of cement-based materials with a high slag content*. Ph. D. dissertation, Technical. 126 p.

Chen Youzhi; Pu Xinchenn. 2001. Hydration Characteristics of Sodium Sulfate Slag Cement System. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater*, 16(4):45–47.

Chrest, A. P. 1994. Guide to Using Silica Fume in Precast / Pressed Concrete Products. *PCI Journal*, 39 (5):36–45.

Dobilinskas, S. 2007. Transporto koridorius. *Jūra – Mopė – Sea*, 5 (46):44–45.

Chen Jian-xiong et al. 2001. Investigation on Durability of Buildings under Severe Acid Rain. *Concrete*, (11): 44–47.

Dailidienė, 2007. I. Kuršių marių hidrologinio režimo pokyčiai. *Geografija*, 1(43):36–46.

Diamond, S. 1977. Cement paste microstructure: An overview at several levels, in: Hydraulic Cement Pastes: Their Structure and Properties, Proc. Symp. *Cement and Concrete Association*, (3):2–31.

Daniel Jansen; Friedlinde Goetz-Neunhoeffer; Christopher Stabler; Jürgen Neuauer. 2011. Remastered external standard method applied to the quantification of early OPC hydration, *Cement and Concrete, Research*, (41):602–608.

Drysdale, D. 1998. *An introduction to fire dynamics*. Second Edition. John and sons, 447 p.

Devi, M.; Kannon, K. 2012. Inhibitory Effect of Triethanolamine in Quarry Dust Concrete. *Coromandal Journal of Science*, (1):10–16.

Emmons, P. H.; Vaysburd, A. M. 1996. System concept in design and construction of durable concrete repairs. *Construction and building materials*, 10 (1): 69–75.

Engelund, S.; Sorensen, J. 1998. A probabilistic model for chloride-ingress and initiation of corrosion in reinforced concrete structure. *Structural safety*, 20 (1):69–89.

Erdogdu, S.; Bremnes, T. W.; Kondratova, I. L. 2001. Accelerated testing of plain and epoxy-coated reinforcement in simulated seawater and chloride solutions. *Cement and concrete research*, 31 (6):861–867.

Gražėnienė, R.; Jakeliūnienė, K.; Jankauskas, K.; Kerienė, J.; Tamulaitienė, B.; Voišnienė, V.; Zalieckienė, E. 2010. *Chemija*. Mokomoji knyga. Vilnius:Technika. 90–226 p.

Gao, J. M.; Qian, C. X.; Wang, B.; Morino, K. 2002. Experimental study on properties of polymer-modified cement mortars with silica fume. *Cement and concrete research*, 32 (1):41–45.

Galvionaitė, A. ir kt. 2007. *Lietuvos Klimatas*. LHMT, 207 p.

Gurskis, V. 1996. Ryšiai tarp betono atsparumo šalčiui ir struktūros rodiklių, iš *Hidroinžinerija ir žemėtvarka: tarptautinės mokslinės konferencijos, įvykusios Kaune, pranešimų medžiaga*. Kaunas: Technologija, 3:54–57.

Gumuliauskas, A.; Skripkiūnas, G. 1997. Cementinis akmuo: struktūros ir savybių formavimasis. *Naujos statybinės medžiagos, konstrukcijos ir technologijos: 5-osios tarptautinės konferencijos, proceedings of 5th international conference, held on May 21-24, Vilnius, Lithuania*. Vilnius : Technika, 59–65 p.

Gumuliauskas, A.; Abromavičius, G. 2001. *Užpildų įtaka betono struktūros dalių stiprumui, iš Betonas ir gelžbetonis: konferencijų pranešimų medžiaga*. Kaunas: Technologija, 41–45 p.

Gailius, A.; Kosior-Kazberuk, A. 2008. Monitoring of Concrete Resistance to Chloride Penetration, *Materials science. Medžiagotyra*, (1):350–355.

Girskas, G. 2015. *Sintetinių ceolitu modifikuoto cementbetonio atsparumas šalčiui*. Vilnius, Technika, 133 p.

Heinz, D.; Gobel, M.; Hilbig, H. et al. 2010. Effect of TEA on fly ash solubility and early age strength of mortar, *Cement Concrete. Research*, (40):392–397.

Hudec, P. 2000. The three percent deicer solution (why it is the most destructive in freezing and thawing tests, In Malhotra, V. M. (Ed.). *Durability of Concrete*, Suppl. Papers 5th Intern. Conference, Barcelona. Farmington Hills: American Concrete Institute, (1): 585–598.

Huang, H.-H.; Chuang, T.-H. 2000. Erosion and wear corrosion behavior of Fe–Mn–Al alloys in NaCl solution. *Materials Science and Engineering*, 292(1):90–95.

Xu, Y.; Chung, D. D. L. 2000. Improving silica fume cement by using silane, *Cement and Concrete Research*, 30 (8):1305–1311.

Hallal, A.; Kadri, E. H.; Ezziane, K.; Kadri, A.; Khelafi, H. 2010. Combined effect of mineral admixtures with superplastizers on the fluidity of the blended cement paste. *Construction and Building Materials*, (24):1418–1423.

Huang, W. H. 1997. Properties of cement-fly ash grout admixed with Bentonite, silica fume, or organic fiber. *Cement and concrete research*, 27 (3):395–406.

Harish, P.; Supriya, J. 2015. Strength and Durability Studies on Silica Fume in Slag Concrete. *IJCERT*, 2(12):1050–1055.

Higgins, D.; Uren, M. 1994. The Effect of GGBS on the Durability of Concrete. *Concrete*, 25:17–19.

Hooton, R. D. 1986. Permeability and Pore Structure of Cement Pastes Containing Fly Ash, Slag, and Silica Fume. *Blended Cements*, 897:128–143.

Janavičius E. 2011. *Betono, veikiama ledą tirpdančių druskų, atsparumas šalčiui*. Kaunas: Technologija. 147 p.

Jacobsen, S.; Sellevold, E. J.; Matala, S. 1996. Frost durability of high strength concrete: Effect of internal cracking on ice formation. *Cement and concrete research*, 26 (6):919–931.

Jiang, J.; Yu, Y.; Chu, H.; Sun, W.; Gao, Y.; She, W. 2016. Simulation of the Cracking and Ablation Behavior of Ferrosiliceous and Siliceous Nuclear Sacrificial Concretes. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci.* Ed. 31(5):982–988.

Kazuyuki, T.; Mitsunori, K. 1994. Effects of Fly Ash and Silica Fume on the Resistance of Mortar to Sulfuric Acid and Sulfate Attack. *Cement and Concrete Research*, 24(2):361–370.

Khatib, J.; Hibbert, J. 2005. Selected Engineering Properties of Concrete Incorporating Slag and Metakaolin, *Construction and Building Materials*, 19:460–472.

Kažys, J.; Stankūnavičius, G.; Rimkus, E.; Bukantis, A.; Valiukas, D. 2011. Long-range alternation of extreme high day and night temperatures in Lithuania. *Baltica*, 24 (2):71–82.

Kamaitis, Z. 1995. *Gelžbetoninių tiltų būklė ir jos vertimas*. Vilnius: Technika. 182 p.

- Kallipi, K. A. 2016. Pore structure of cement-based materials. Testing, interpretation and requirements, *Modern concrete technology series*, (12):1–33.
- Kaufman, J. P. 2004. Experimental identification of ice formation in small concrete pores, *Cement & Concrete Research*, 34(8):1421–1427.
- Kaufmann, J. 2000. Freezing and thawing hysteresis effects in experimental analysis of frost deicing salt resistance of cementitious materials, *ACI Special Publication*, 192(4): 677–692.
- Kamaitis, Z.; Jokubaitis, V. 1986. *Gelžbetoninių ir mūrinių konstrukcijų atstatymas ir stiprinimas*. Vilnius, 91 p.
- Kliukas, R.; Kudzys, A. 2004. Probabilistic durability prediction of existing buildin elements. *Journal of civil enginengineering and management*, 10 (2):107–112.
- Kudzys, A.; Kvedaras, A. K.; Kliukas, R. 2004. Methodological Approaches on Structural Durability Assessment. Probabilistic Safety Assessment and Management (PSAM7-ESREL'04): *proceedings of the International Conference on Probabilistic safety assessment and management*, 4:2167–2173.
- Kerienė, J. *Chemija*. 2014. Vadovėlis. Vilnius:Technika. 83–311 p.
- Kaufmann, J. 2000. Freezing and thawing hysteresis effects in experimental analysis of frost deicing salt resistance of cementitious materials, *ACI Special Publication*, 192(4): 677–692.
- Kallipi, K. A. 2006. Pore structure of cement-based materials. Testing, interpretation and requirements. *Modern concrete technology series*. 12:1–33.
- Khatri, R P.; Guirguis, S.; Sirivivatnanon, V. 2001. 60 Years Service Life of Port Kembla Concrete Swimming Pool, *Proceedings of Concrete 2001, Concrete Institute of Australia Biennial Conference*, 1:55–62.
- Kowalczyk, M. 2014. The mechanism of water – isopropanol exchange in cement pastes evidenced by NMR relaxometry. *RSC Advances*, 40:20616–21175.
- Le Bellego, C. 2003. Coupled mechanical and chemical damage in calcium leached cementitious structures. *Journal of engineering mechanics*, 129 (3):333–314.
- Lee, M. G.; Wang, Y. C.; Chiu C. T. 2007. A preliminary study of reactive powder concrete as a new repair material. *Construction and building materials*, 21:182–189.
- Lee, J. S.; Ray, R. I.; Little, B. J. 2001. The influence of experimental conditions on the outcome of laboratory investigations using natural coastal seawaters. *Corrosion* 66(1): 1–6.
- Li, S.; Geissert, D. G.; Frantz, G. C.; Stephens, J. E. 1999. Freeze-thaw bond duf rapid – setting concrete repair materials. *ACI Materials journal*, 96 (2):242–249.
- Li, G. 2003. A new way to increase the long-term bond strenght of new-to-old concrete by the use fly ash. *Cement and concrete research*, 33 (6):799–806.

Liang, M. T.; Lan, J. J. 2005. Reability for the existing reinforced concrete pile corrosion of bridge substructure. *Cement and concrete research*, 35 (3):540–550.

Lindišas, L. 1998. *Gelžbetoninių hidrotechninių statinių techninės būklės įvertinimo metodikos sudarymas, gelžbetoninių HTS būklės įvertinimas ir jų susisteminimas*. Mokslinio tiriamojo darbo ataskaita, Kaunas-Akademija, 102 p.

Meier, H. E. M.; Broman, B.; Kjellström, E. 2007. Simulated sea level in past and future climates of the Baltic Sea. *Climate research* 27, 1:59–75.

Martynaitis, M. 1974. *Mineralinės rišamosios medžiagos*. Kaunas: KPI, 294 p.

Martusevičius, M.; Kaminskas, R.; Mituzas, J. A. 2002. Rišamųjų medžiagų cheminė technologija. Kaunas: Technologija. 206 p.

Mehta, P. K.; Monteiro, P. J. 1993. *Concrete structure, properties and materials*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliff, New jersey, Second Edition. 548 p.

Marčiukaitis, G. 2000. Betono mišinio sudėties ir kokybės įtaka konstrukcijų standumui ir pleišetumui, iš Betonai ir gelžbetonis, konferencijų pranešimų medžiagos. Kaunas: Technologija, (1):36–41.

Marchand, J.; Sellevold, E J.; Pigeon, M. 1994. The Deicer Salt Scaling Deterioration of Concrete – An Overview. *Durability of Concrete*, (2):1–25.

Mohamed A. Heba. 2011. Effect of Fly Ash and Silica Fume on Compressive Strength of Self-Compacting Concrete under different Curing Conditions. *ASEJ*, 2 (2):79–86.

Myadaraboina Himabindu et. al. 2014. Development of High Volume Fly Ash Concrete using Ultra-Fine Fly Ash. *ACMSM23*, 1:65–70.

Michael T. Bamforth et al. 1999. Modeling Chloride Diffusion in Concrete: Effect of Fly Ash and Slag. *Cement and Concrete Research*, 29(4):487–495.

Naujokaitis, A. 2007. *Statybinės medžiagos. Betonai*. Vilnius. Technika. 355 p.

Naujokaitis, A. 2006. *Statybinės medžiagos užpildai*. Vilniaus Gedimino technikos universitetas. 247 p.

Nedhi, M.; Mindess, S.; Aitcin, P. 1996. Optimization of high strength limestone filler cement mortars. *Cement and Concrete Research*, (26):883–893.

Nazeer, M.; Anupama, P. S. 2014. Strength and Durability Studies on Silica Fume Modified HVFAC. *IJARET*, 5 (10):55–68.

Nehdi, M.. 2003. Why some carbonate filler cause rapid increases of viscosity in dispersed cement – based materials. *Cement and Concrete Research* 30, (1):1663–1669.

Papadakis Vagelis G. 1999. Experimental Investigation and Theoretical Modelling of Silica Fume Activity in Concrete. *Cement and Concrete Research*, 29 (1):79–86.

- Pupienis, D.; Jalinskas, P.; Vyšniauskas, I. 2007. The influence of currents on possible dispersion of oil products in the South-East Baltic. *Acta zoologica Lituanica*, 17(2):160–171.
- Palacios, M. F.; Puertas, P. Bowen and Y. F. Houst. 2009. Effect of PCs Superplasticizers on the Rheological Properties and Hydration Process of Slag-Blended Cement Pastes. *Journal of Materials Science*, 44 (10):2714–2723.
- Powers, T. C.; Brownyard, T. L. 1942. Studies of the physical properties of hardened Portland cement paste. *J. Am. Concr.* (18):549–602.
- Powers, T. C.; Helmuth, R. A. 1953. Theory of volume changes in hardened Portland cement paste during freezing, *Proc. Highway Res. Board* 1953, (32):285–297.
- Powers, T. C. 1945. A working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete, *J. Am. Concr. Soc.* 16: 245–271.
- Powers, T. C. 1949. The air requirements of frost-resistant concrete. *Proceedings of the Highway Research Board*, Portland Cement Association, Bulletin, (33):1–28.
- Powers, T. C.; Brownyard, T. L. 1947. Studies of the physical properties of hardened Portland cement paste, *J. Am. Concr. Inst.* (18):933–969.
- Parveen, Vivek; Bhupinder, S. 2015. Effect of Fly Ash in PPC. *IJRDET*, 4 (1):12–17.
- Patil, S. N.; Kale, J. N.; Suman, S. 2012. Fly Ash Concrete: A Technical Analysis for Compressive Strength. *IJAERS*, 2 (1):128–129.
- Roa-Rodriguez, G.; Aperador, W.; Delgado, A. 2016. Calculation of Chloride Penetration Profile in Concrete Structures. *Departament of Engineering*, Universidad Militar Nueva Granada, Carrera, (11):101–80.
- Ramaswamy V. 2012. Compressive strength and durability properties of Rice Husk Ash Concrete. *KSCE Journal of Civil Engineering*, (1):93–102.
- Rimkus, E.; Kažys, J.; Bukantis, A. 2009. Gausių kritulių Lietuvoje prognozė XXI amžiui pagal regioninį CCLM modelį, *Geografija* 45(2):122–130.
- Sanchez, M.; Gregori, J.; Alonso, C.; Garcia-Jareno, J.; Takenouti, H.; Vicente, F. 2007. Electrochemical impedance spectroscopy for studying passive layers on steel rebars immersed in alkaline solutions simulating concrete pores. *Science Direct*, 52:7634–7641.
- Strolytė, S.; Rimkus, E. 2012. Vėjo krypties ir greičio kaita Lietuvoje 1971–2010 metais. *Geografija* 48(2):97–107.
- Skripkiūnas G. 2007. *Statybinių konglomeratų struktūra ir savybės*. Vadovėlis. KTU.Vitae Litera. 344 p.

Skripkiūnas, G.; Augonis, A.; Daukšys, M. 2004. Stambaus užpildo granulometrijos įtaka betono mišinio ir betono savybėms, iš *Pažangioji statyba: konferencijų pranešimų medžiaga*. Kaunas: Technologija, 167–174.

Skripkiūnas, G.; Vaitkevičius, V.; Ščiukas, R. 2000. Stambaus užpildo įtaka betono stiprumui, iš *Betonas ir gelžbetonis: konferencijų pranešimų medžiaga*. Kaunas, 89–94.

Skripkiūnas, G.; Girskas, G.; Nagrockienė, D. 2012. Freeze-thaw and de-icing salt resistance of the hardened cement paste modified with the synthetic zeolite. *International congress on durability of concrete* (ICDC 2012, 1:1–13.

Skripkiūnas, G.; Vaitkevičius, V. Dauksys, M.; Grinys, A. 2012. Prediction of concrete freezing – thawing resistance. *Materials Science*, 18 (4):319–324.

Stankevičius, V.; Barkauskas, V. 1997. *Pastatų atitvarų šiluminė fizika*. Kaunas: Technologija, 269 p.

Skominas, R. 2008. *Aplinkos poveikio sukeltų pažeidimų įtaka hidrotechnikos statinių patikimumui ir remonto ilgaamžiškumui*. Daktaro disertacija. Akademija. 109 p.

Suhua Ma.; Weifeng Li.; Shenbiao Zhang.; Yueyang Hu.; Xiaodong Shen. 2015. Study on the hydration and microstructure of Portland cement containing diethanol-isopropanolamine. *Cement and Concrete Research*, (67):122–13.

Shirish V. Deo & Arun D. Pofale. 2015. Parametric Study for Replacement of Sand by Fly Ash for Better Packing and Internal Curing, *OJCE*, 5:118–130. *Construction and Building Materials*, 25:3245–3256.

Shi, C.; Wu, Y. 2005. Mixture proportioning and properties of self-consolidating lightweight concrete containing glass powder. *ACI Mater. J.*, 102 (5):355–363.

Sosa, M.; Pérez-López, T.; Reyes, J., Corvo, F.; Camacho-Chab, R.; Quintana, P.; Aguilar, D. 2011. Influence of the Marine Environment on Reinforced Concrete Degradation Depending on Exposure Conditions. *Electrochem*, 6: 6300–6318.

Shang, H. S.; Song, Y. P. 2006. Experimental study of strength and deformation of plain concrete under biaxial compression after freezing and thawing cycles. *J. Cement Concrete Research*, 36(10):1857–1864.

Trocónis de Rincón, O., Castro, P. E. I. Moreno, Torres-Acosta, A. A.; Morón de Bravo O.; Arrieta I.; García C.; García, D.; Martínez Madrid, M. 2004. Chloride profiles in two marine structures – meaning and some prediction Build. *Environ.*, 39 (9):1065–1070.

Tsivilis, S.; Chaniotakis, E.; Badogiannis, E.; Pahoulas, G.; Ilias, A. 1999. A study on the parameters affecting the properties of Portland limestone cements. *Cement and Concrete Composites*, (21):107–116.

Thangraj, R.; Thenmozhi, R. 2012. Performance of High Volume Fly Ash in Concrete Structures. *IOSR-JMCE*, 3 (1):28–33.

Vakhshouri, B.; Nejadi, S. 2016. Mix design of light-weight self-compacting concrete. *Science Direct*, 4:1–14.

Vektaris, B.; Vilkas, B. 2006. *Betono tvarumas*. Monografija. Kaunas. Technologija. 162 p.

Velázquez, S.; Monzó, J.; Borrachero, M. V.; Soriano, L.; Payá, J. 2016. Evaluation of the pozzolanic activity of spent FCC catalyst/fly ash mixtures in Portland cement pastes. *Thermochimica Acta*, (632):29–36.

Vyšniauskas, I. 2003. *Vandens druskingumas pietrytinėje Baltijoje. Baltijos jūros aplinkos būklė*. Monografija. Kaunas: Technologija, 35–38.

Valenza II, J. J.; Scherer, G. W. 2006. Mechanism for salt scaling. *Journal of the American ceramic Society*, 89(4):1161–1179.

Valenza, J. J.; Scherer, G. W. 2007. A review of salt scaling I. *Phenomenology, Cement and Concrete Research*. (37):1007–1021.

Penttala, V. 2006. *Cement and Concrete Research* 36, (1):921–928.

Wang, K., Nelsen, D., Nixon, W. 2006. Damaging effects of deicing chemicals on concrete materials. *J. Cem. Concr. Compos.* 28(2):173–188.

Wang, C. J., Chang Y. C. 2002. NaCl-induced hot corrosion of Fe–Mn–Al–C alloys. *Materials Chemistry and Physics*, 76(2):151–161.

Weichung, Yeih, Tun Chi Fu. Jiang Jhy Chang; Ran Huang. 2015. Properties of pervious concrete made with air-cooling electric arc furnace slag as aggregates Department of Harbor and River Engineering, National Taiwan Ocean University, Keelung 202, Taiwan *Construction and Building Materials*, 1:737–745.

Xiao-mei W., Folker, H. W.; Tie – jun Zhao; Hong Fan. 2013. Chloride content and pH value in the pore solution of concrete under carbonation. *Applied Physics and Engineering*, 14:71–78.

Xianming Shi.; Ning X.; Keith F.; Jing G. 2012. Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: An overview. *Construction and Building Materials*, 30:125–138.

Zelic, J.; Krstulovic, R.; Tkalčec, E.; Krolo, P. 2000. The properties of Portland cement-limestone-silica fume mortars. *Cement and Concrete Research*, 30 (1):145–152.

Муштаков, М.; Трофимов, Б. 1981. *Коррозия бетона и железобетона*. Челябинск. 103 с.

Ферронская, А. В. 2006. *Долговечность конструкций из бетона и железобетона* учебн. пособие ,А. В. Ферронская. – М.: Изд-во АСВ, 336 с.

Алексеев, С. Н. 1990. *Долговечность железобетона в агрессивных средах*. М.: Стройиздат, 320 с.

Розенталь, Н. К. 2008. *Методы коррозионных испытаний бетона*. Бетонные и сухие смеси. 312 с.

Иванов М. МОДРИ С. 1990. *Долговечность железобетона в агрессивных средах*, Москва, 320 с.

Шейкин, А. Е.; Добшиц, Л. М. 1989. *Цементные бетоны высокой морозостойкости*, Стройиздат, Лен. Отд, Л., 128 с.

Тейлор, Х. Ф. У. 1969. *Химия цемента*, Стройиздат, Москва. 104 с.

Невиль, А. М. 1972. *Свойства бетона*. Изд.Лит-ры по строительству. 344 с.

Шалим, М. А. 1986. *Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии*. Минск: Высшая школа, 199 с.

Баженов, Ю. М. 1987. *Технология бетона*. Москва: Высшая школа, 415 с.

Волженский ,А. В. 1986. *Минеральные вяжущие вещества*. Москва: Стройиздат, 463 с.

Autorės mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Lebedeva, R.; Skripkiūnas, G.; Kičaitė, A. 2016. Influence of mineral additives on environmental resistance of concrete, *Construction science*, ISSN 1407-7329, 18: 10–16 (Index Copernicus).

Lebedeva, R. 2015. Šlako priedo įtaka betono atsparumui Baltijos jūros aplinkai, *Proceedings of the 18th Conference for Junior Researchers „Science – Future of Lithuania“*, 7(7): 1–10, eISSN 2029–7149.

Lebedeva, R. 2013. Jūrinėje aplinkoje eksploatuoto hidrotechninio betono savybių analizė. *Proceedings of the 16th Conference for Junior Researchers „Science – Future of Lithuania“*, 5(5): 481–486, ISSN 2029-2252.

Lebedeva, R.; Skripkiūnas, G. 2013. Требования Европейского стандарта к гидротехническому бетону, эксплуатируемому в морской среде, *Проблемы современного бетона и железобетона*, ISSN 2076-6033, 99–110.

Summary in English

Introduction

Problem formulation

The Baltic sea environment affects reinforced concrete structures, which are exploited in Klaipeda sea port (quays, piers, breakwaters), embankments of coastal rivers and on the embankments built in the curonian spit. The current condition of these hydrotechnical structures shows that numerous defects appear in Klaipeda port aquatorium during the exploitation, especially on the surface of hydrotechnical structures, huge expenses are consumed for the repair and reconstruction of hydrotechnical structures. Correct assessment of environmental conditions during designing and building of hydrotechnical structures and the use of specific concrete enable to prolong the exploitation duration of hydrotechnical structures and retrench expenses. For solving of that problems more accurate concrete durability testing methods and technological procedures for durability increase are required.

The results of this investigation may be applied for the preparation and improvement of normative documentation and new technologies for hydrotechnical concrete production, exploited in the Baltic sea environment and technology of concrete works.

Relevance of the thesis

Quite a lot of hydrotechnical structures are built and exploited in Lithuania as well as in other Baltic sea countries, the structures are affected by the Baltic sea environment (salty water, temperature and humidity changes, freezing and thawing cycles, etc.). It is important to analyze and determine hydrotechnical concrete exploitation conditions under the impact of the Baltic sea environment and to apply them for newly designed hydrotechnical structures, to generate durability testing methodology for hydrotechnical concrete exploited in the Baltic sea environment. The formulation of the testing methods to assess all impacts causing the concrete destruction (environmental impacts, corrosion and cyclic freezing and thawing processes) and the parameters characterizing hydrotechnical concrete destruction process, such as mass loss of the concrete surface, changes in ultrasound velocity, sorption and desorption parameters, and to use them for the creation of concretes which are resistant to the aforementioned factors is important as well.

The thesis results should be applied for the specification and control of hydrotechnical concrete performance properties and for the production of cement concrete resistant to the impact of the Baltic sea environment.

Research object

Study object is hydrotechnical concrete, modified by active mineral additives, affected by the impact of the Baltic sea environment during its exploitation.

Aim of the thesis

The aim of the thesis is by the exploitation conditions of hydrotechnical reinforced concrete structures in the Baltic sea environment to determine the requirements for raw materials and establish the composition, which would guarantee economically – based concrete exploitation duration in the BSE.

Objectives of the thesis

The following objectives have been solved in order to achieve the aim of the thesis:

1. To analyze the characteristic defects which appear in Klaipeda port hydrotechnical structures exploited in the Baltic sea environment.
2. To analyze the conditions (temperature changes, humidity changes, the number of freezing and thawing cycles, speed and direction of wind, waviness, chemical impact, etc.) of hydrotechnical structures in the Baltic sea environment.
3. To determine the impact of the Baltic sea water on the destruction of hydrotechnical concrete due to the effect of cyclic freezing and thawing by experimental studies.
4. To analyze the influence of active mineral additives (blast furnace slag, lime, fly ash, silicon microfibers) and different mineral composition aggregates on the durability of hydrotechnical concrete exploited in the Baltic sea environment.

5. To prepare the testing method of durability assessment for hydrotechnical concrete exploited in the Baltic sea environment.

Research methodology

The assessment of technological characteristics of hydrotechnical concrete mixtures and the assessment of hardened concrete exploitation qualities were carried out according to the European standards.

Special testing methodology based on the capillary absorption method of concrete sample impregnation in saline solution corresponding to the chemical composition of the Baltic sea water, implementing cyclic impact of freezing and thawing, and assessing the test results according to the loss of mass off the test surface and ultrasound velocity changes in order to analyze decomposition processes of the concrete, exploited in the Baltic sea environment. The climatic camera with automatic temperature control was used during the test.

Nordtest NT492 methodology, based on chloride penetration, stimulated electrical potential, depth measurement in concrete was applied in research.

Scientific novelty of the thesis

Scientific knowledge about the factors causing concrete decomposition processes in the Baltic sea environment and concrete durability in that conditions evaluation characteristics were obtained.

Test method of durability for hydrotechnical concrete, affected by the Baltic sea environment, was created using capillary absorption means to impregnate concrete surface in the Baltic sea water saline solution and cyclic freezing and thawing, assessing the concrete decomposition process by mass loss off the surface and changes in ultrasound velocity.

New scientific knowledge about the impact of active mineral additives on the durability of hydrotechnical concrete, exploited in the BSE, was received. The results were used for the compositional selection of hydrotechnical concrete, exploited in the BSE.

Practical value of research findings

Hydrotechnical concrete testing method of durability testing has been formulated, which can be used to assess the durability of the concrete of hydrotechnical structures exploited in the Baltic sea environment and the proposals for increasing the resistance to the impact of the Baltic sea environment by adding of slag and microsilica mineral additives to cement concrete mixtures with conventional Portland cement, were provided. Recommendation on suitable aggregates for hydrotechnical concrete, exploited in the Baltic sea environment, were established.

Defended statements

1. Concrete surface decomposition and reinforcement corrosion phenomena, not the internal damage with reduction of the concrete strength, are typical for the

reinforced concrete structures exploited in the BSE, which appear due to concrete moistening with salty water and temperature fluctuations.

2. Concrete resistance to the impact of the BSE may be predicted according to the loss of mass off the concrete surface by capillary absorption means to impregnate concrete surface in the Baltic sea water saline solution and cyclic freezing and thawing.
3. The durability of the concrete exploited in the BSE can be increased by modifying of concrete with blast furnace slag and SiO₂ microfiber mineral additives which reduce the sorbent water absorption of concrete.

Approval of the research findings

Four scientific articles are printed on the topic of the dissertation: two – reviewed scientific journals (Lebedeva 2013, 2015), two – in peer reviewed scientific journals (Lebedeva *et al.* 2013, 2016).

The results of the dissertation research were published at five scientific conferences and three seminars:

- Young Scientist Conferences „*Science – The Future of Lithuania*“, 2013, 2015, 2016, Vilnius, Lithuania;
- International Conference „*Advanced Materials and Technologies*“, 2016, Palanga, Lithuania;
- International Conference „*Fly ash in construction*“, 2017, Brno, Czech Republic;
- A scientific presentations submitted to a manufacturing company UAB „*Perdanga*“, 2013, 2014, Klaipėda, Lithuania;
- Scientific report submitted *State Enterprise Klaipėda state seaport authority*, 2016, Klaipėda, Lithuania.

Structure of the thesis

The dissertation consists of the introduction, three chapters, general conclusions, a list of references and publications of the author of the dissertation.

The paper comprises 135 pages, excluding summary in the English language and annexes; it contains 4 numbered formulas, 103 figures and 23 tables. 156 sources of literature were used when writing the dissertation.

1. Analysis of sea environment influence on durability of concrete for hydrotechnical structures

Hydrotechnical concrete is a material of conglomerate structure characterized by capillary porosity. Capillary absorption of hydrotechnical concrete is caused by absorption of sea water into the capillaries through which it rises upwards in the concrete structures. (Skripkiūnas 2007) The level of sea water rise depends on moisture content in concrete and surface of concrete capillaries walls. Capillary absorption is characteristic for hydrotechnical structures of the Klaipėda Port – quays, due to its continuously exposure to sea water on different surface levels. Sea water moves from the

moist concrete layer towards the drier surface caused by diffusion process, which leads to certain corrosion processes in cement composites with specific chemical composition (Chisholm, Lee 2001). The composition of hydrotechnical concrete can be supplemented with mineral additives – cementitious material with amorphous silica, which reacts with cement hydration products (Navickas, Vektaris, Žvironaitė 2005).

The durability of hydrotechnical concrete is defined as the concrete resistance to action of Baltic sea environment (BSE), chemical and mechanical loads and wear with retaining of the desired engineering properties.

2. The materials used for research and test methods for concrete resistance to the sea environment

The Portland cement with different mineral additives was used for testing such as CEM I 42.5 R (without additives, finely ground), CEM I 42.5 N (without additives), CEM II / A–LL 42.5 N (with 17% of limestone, CEM II / AS 42.5 N (with 17% of blast-furnace slag), CEM III / B 32.5 N (with 70% of blast- furnace slag) and mineral additives such as: fly ash and silica fume (SiO_2). The sand 0/4 fraction, crushed granite 2/8 and 11/18 fraction, crushed gravel 4/16 fraction were applied as aggregates. The plasticizing and air entraining admixtures according to the requirements of EN 934–2 were used during experiments. For the BSE action testing the concrete sample edges were open, not insulated with any hermetic material, the test surface of the sample in a plastic gasket on plastic spacers was 5 mm immersed in a saline solution corresponding to the chemical composition of the Baltic sea water (Fig. S.2.1).

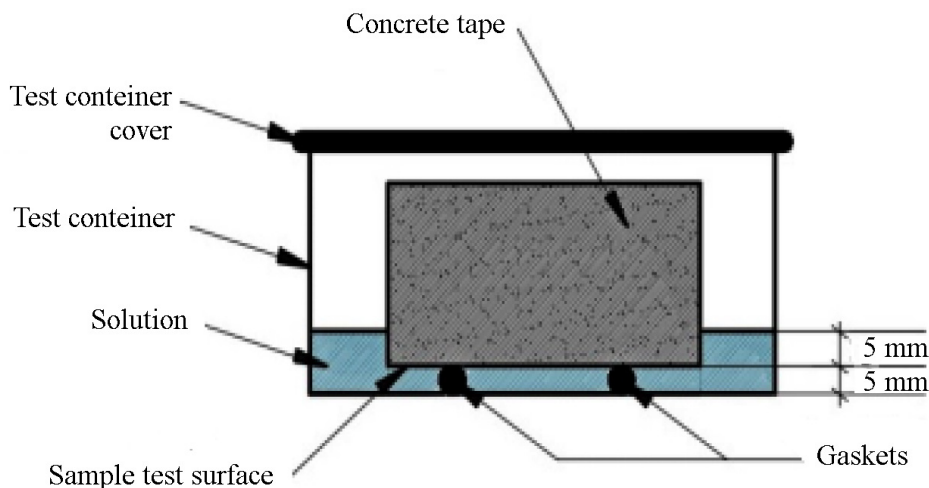


Fig. S.2.1. Testing scheme of hydrotechnical concrete
Baltic sea environment resistance

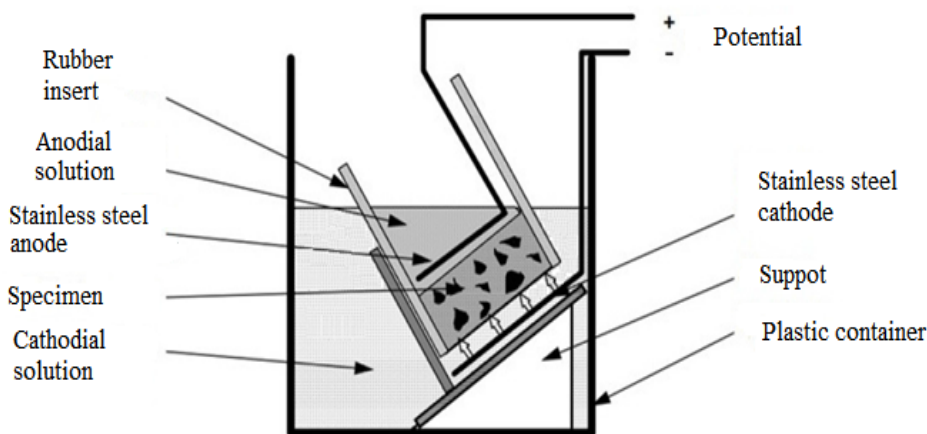


Fig. S.2.2. Testing scheme for chloride penetration in hydrotechnical concrete

Measurement of concrete sorption, determination of chloride penetration and coefficient of chloride diffusion were tested in the investigation.

The diffusion coefficient of chlorides for samples was determined by NT BUILD-942 methodic – the measurement of chloride permeation in concrete at specified electric potential (Fig. S.2.2).

3. Research of modified hydrotechnical concrete resistance to the sea environment

The decomposition of surface layer, crumbling of cement mortar to the coarse aggregates or reinforcement, decomposition of protective layer of reinforcement and corrosion of reinforcement are observed most frequently in hydraulic engineering structures of Klaipėda seaport. In hydrotechnical engineering structures, during their exploitation, the capillary absorption of sea water. The observation of hydrotechnical engineering structures demonstrates that the capillary absorption of sea water, which depends on the porosity parameters of concrete and environmental conditions, reaches a few tens of centimeters.

The amount of salts in the Baltic sea water was determined by chemical analysis. The chemical analysis was carried out for the northern part of the curonian lagoon (near the Klaipėda Port Gate), for the middle part of Klaipėda port and for the intersection of the curonian lagoon and the Dane river. The average level of cations and anions in all points for the salts in the Baltic sea and the Dane river indicate that the content of Cl ions ranges between 1430 and 1580 mg/l, the level of sulphates is significantly lower and ranges from 810 to 900 mg/l.

The concrete samples from hydrotechnical engineering structures exploited more than 20 years were taken to determine the changes in concrete. The results of the physical and mechanical tests of concrete exploited in the BSE demonstrate that the

average density of concrete is 2369 kg/m³, the average compressive strength of hydrotechnical concrete is 56.5 MPa and exceeds the required strength for the concrete strength grade M450 with average compressive strength 45.8 MPa used in construction. The results show that the compressive strength of concrete increase during exploitation. Hence, the volumetric decomposition of concrete characterized by decrease in compressive strength was not observed for the investigated exploitation conditions. The density and strength of concrete in the drill cores for the Dane river embankment showed the same results.

The salt content in concrete used in Klaipėda seaport and in the Dane river after exploitation have essential differences. The salt level in concrete from Dane river was found as significantly lower in comparison with the salt level in concrete from sea water. The study showed that sulphate and chloride content in concrete after exploitation in sea water is 2400 mg/l for sulfates and 1640 mg/l for chlorides. The sodium and potassium ions contents in concrete after exploitation are 1400 mg/l and 2900 mg/l respectively. High levels of potassium ions in concrete (twice as high as sodium ions) can be explained by the stevedoring of potassium fertilizers in that area and their amount in sea water.

The research of hardened cement paste resistance to the action of the Baltic sea water demonstrated that the introduction of mineral additives to cement and usage of the additional mineral additives influence significantly on durability of cement composites applied in the BSE. According to the results of the research, it can be concluded that portland cement or slag cement with 5% silica fume is best suited for the concrete used in the Baltic sea environment. The consistency of concrete mix decreases in the course of replacing of cement by certain amount of different mineral additives due to their greater dispersion and more irregular shape of particles. The blast furnace slag, fly ash and limestone additives reduce the amount of entrained air in the concrete mix slightly, while the silica fume additive increases the amount of entrained air in concrete. Replacing of cement by the blast furnace slag, fly ash or limestone additives reduces the compressive strength of concrete in the equal extent, in turn silica fume introduced up to 6% of cement weight does not reduce the concrete compressive strength. The replacement of cement with blast furnace slag up to 70% after 28 days reduces the compressive strength of concrete by 5.7%, the fly ash up to 70% reduces the compressive strength of concrete by 8.8%, and silica fume up to 2% lightly increases the concrete strength and above 6% reduce the strength.

The results of the concrete sorption and desorption analysis tested with replacing of cement with blast furnace slag additive and limestone additive in salt solution of the Baltic seawater chemical composition, are presented in Fig. S.3.1 and Fig. S.3.2.

The lowest sorption observed for the samples with 17% granular blast furnace slag additive. The samples without granular blast furnace slag additives demonstrated the highest sorption. The samples with 17% limestone additive had a high sorption, which was almost equivalent to the sorption of samples with 70% of blast furnace slag. The samples with high values of sorption showed the low resistance to freezing and thawing in wet condition.

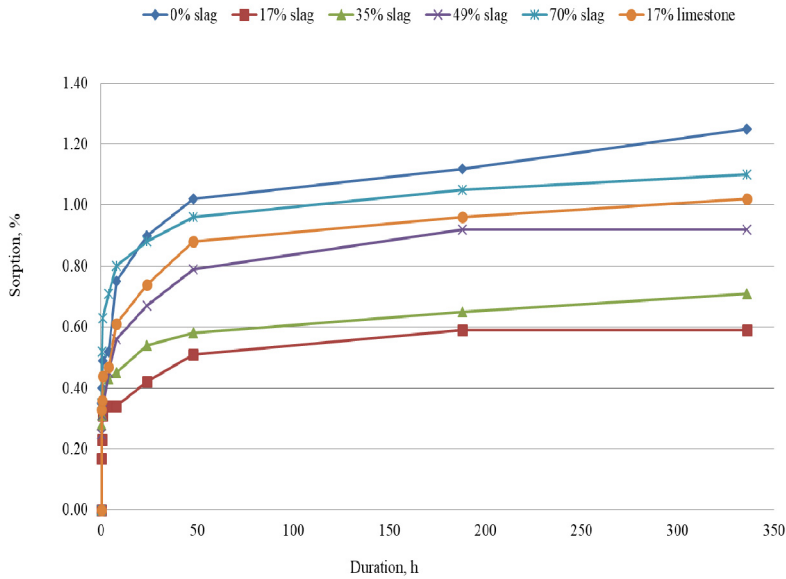


Fig. S.3.1. Hydrotechnical concrete with different blast furnace slag and limestone content sorption

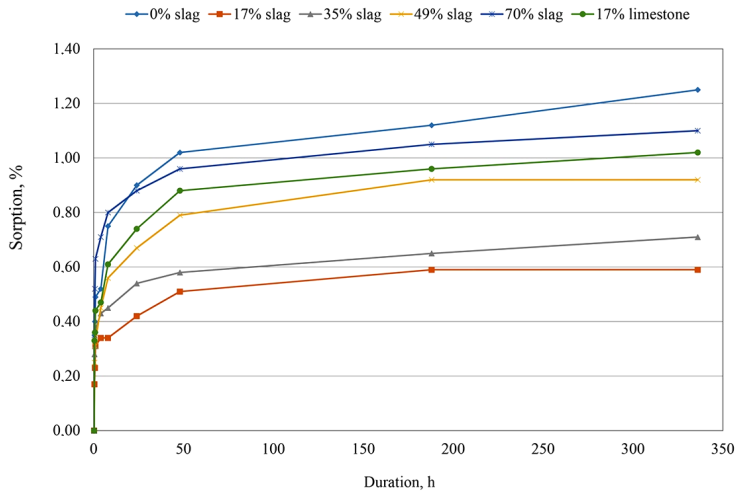


Fig. S.3.2. Hydrotechnical concrete with different blast furnace slag and limestone content desorption testing results

Fig. S.3.3 and Fig. S.3.4 presents the results of sorption and desorption respectively of the hydraulic structures concrete with different dosage of fly ash (0%, 17%, 35%, 49% and 70%) after 28 days. The sorption of concrete increases with the increase of fly

ash especially when the dosage exceeds 17%. It can be concluded that the use of fly ash increases the water sorption of concrete and as a consequences reduce the resistance of concrete to freezing and thawing action in wet conditions.

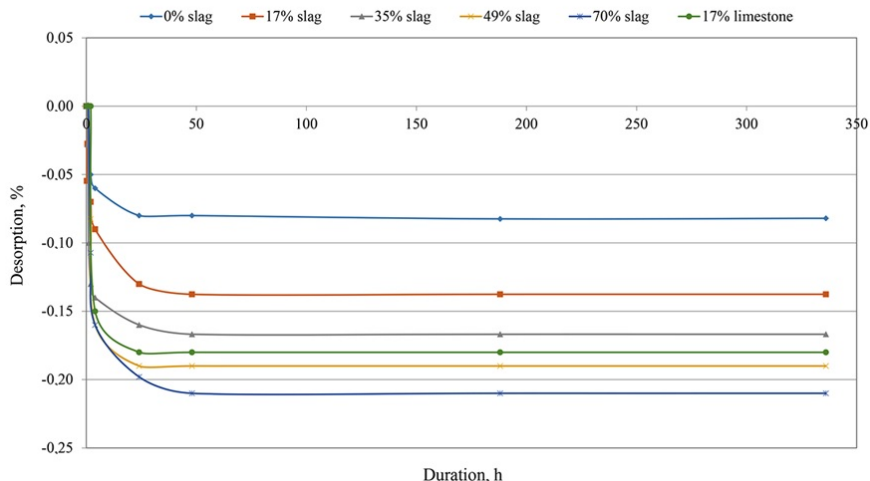


Fig. S.3.3. Hydrotechnical concrete with different fly ash content sorption testing results

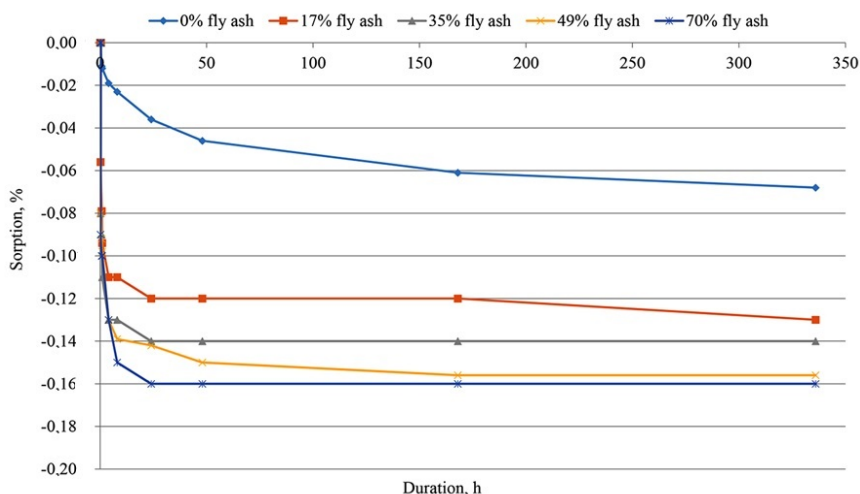


Fig. S.3.4. Hydrotechnical concrete with different fly ash content testing results

Fig. S.3.5 and Fig. S.3.6 shows the results of sorption and desorption respectively at 28 days for concrete of hydraulic structures containing 17% of fly ash and different amount of silica fume (0%, 2%, 4%, 6% and 7%). The results in Figure demonstrates

that the concrete sorption value decreases constantly with an increase of silica fume dosage up to 7% by weight of cement. The sorption value reduce by 0.05% to 0.08%, in other words about 5 times by replacing of cement by 7% of silica fume.

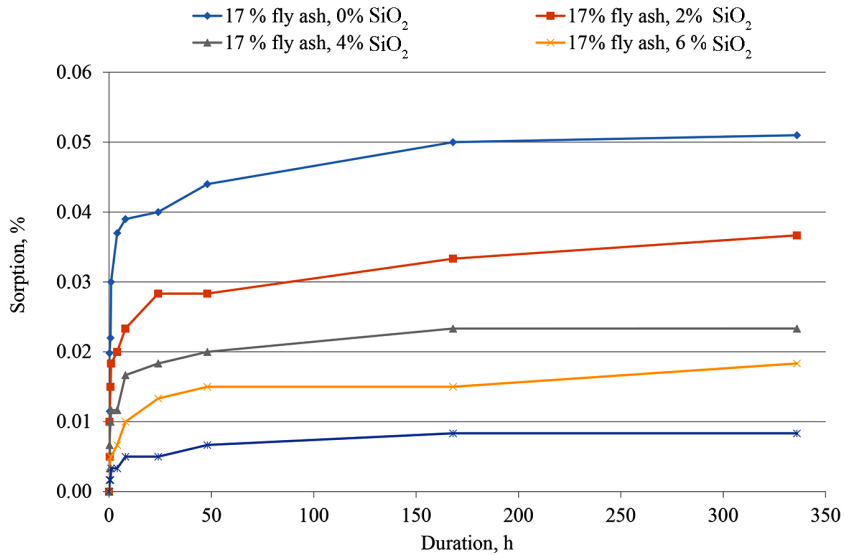


Fig. S.3.5. Hydrotechnical concrete with 17% fly ash and different silica fume (SiO₂) content sorption testing results

The concrete sorption – desorption parameters may indicate the durability of concrete during its exploitation in the Baltic sea environment (BSE). The results of concrete sorption – desorption and mass loss resistance to the BSE action show that the sorption rate of concrete should not exceed 0.8% after 2 weeks. The resistance tests of hydrotechnical concrete with different mineral additives to the Baltic sea environment (BSE). The samples of hydrotechnical concrete were examined, photographed, and placed in the saline solution corresponding to the chemical composition of the Baltic sea water with further tests after 7. 14. 21. 28. 35. 42. 49. 56 and more freezing and thawing cycles. Fig. S.3.7 shows the mass loss during the test of hydrotechnical concrete surface after cyclic freezing and thawing with increase of the blast furnace slag content in the cement. Up to 35% of cement replacement with blast furnace slag, the decrease of the mass loss from the test surface from 0.14 to 0.1 kg/m² after 119 freezing and thawing cycles in the Baltic sea water chemical composition solution was obtained. The mass loss increases with the future increase of the slag dosage and can reach the values up to 0.29 kg/m² with 70% of the blast furnace slag in cement. Therefore, it can be stated that the optimum amount of blast furnace slag in cement used for concrete in the Baltic sea environment (BSE) is 35%. The portland cement containing 17% of limestone showed the worst results in the Baltic sea environment (BSE) resistance tests. The mass loss was 0.4 kg/m² after 119 test cycles. Thus the cement with limestone additive is not suitable for concrete exploited in the Baltic sea environment. The greater difference in mass losses for samples with different dosage of mineral additives is evident after a larger number of test cycles (56

and more), so at least 56 test cycles are required in order to determine the resistance of the concrete to the impact of the Baltic sea environment as seen in Fig. S.3.7.

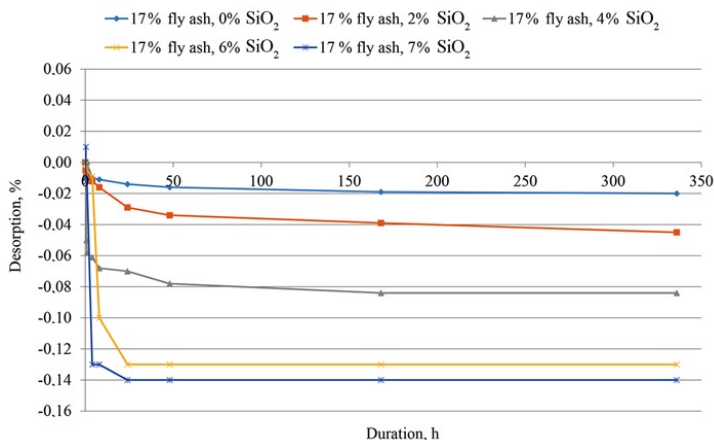


Fig. S.3.6. Hydrotechnical concrete with 17% fly ash and different silica fume (SiO₂) content desorption testing results

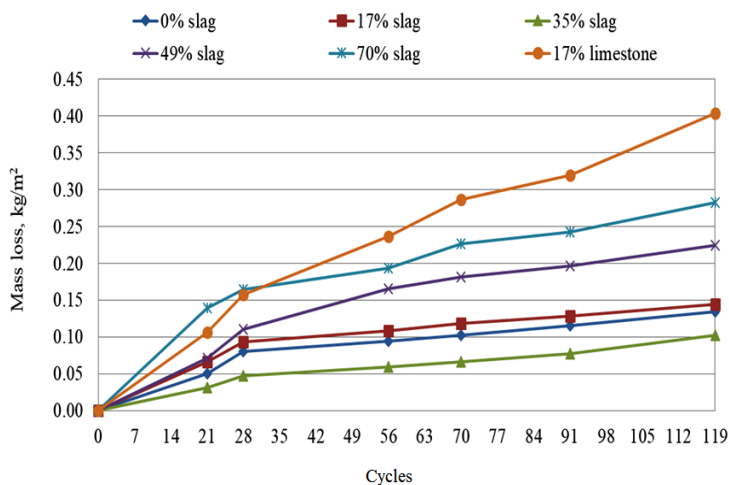


Fig. S.3.7. Hydrotechnical concrete containing different contents of blast furnace slag and limestone additives contents resistance to the Baltic sea environment testing

Fig. S.3.8 shows the mass loss of the concrete based on cement with different dosage of fly ash additive (from 0 to 70%). The mass loss of concrete surface increases with the increase of content of fly ash in cement. A significant increase in mass loss was obtained for dosage of fly ash up to 35%. The mass loss reaches 0.7 and 1.19 kg/m² with fly ash content 17 and 35%, respectively. The maximum mass loss from the test surface by 1.6 kg/m² is obtained for 70% of fly ash in cement. The higher mass loss di-

ferences were obtained after 56 test cycles for concrete with different dosage of fly ash as well as for concrete with different levels of blast furnace slag.

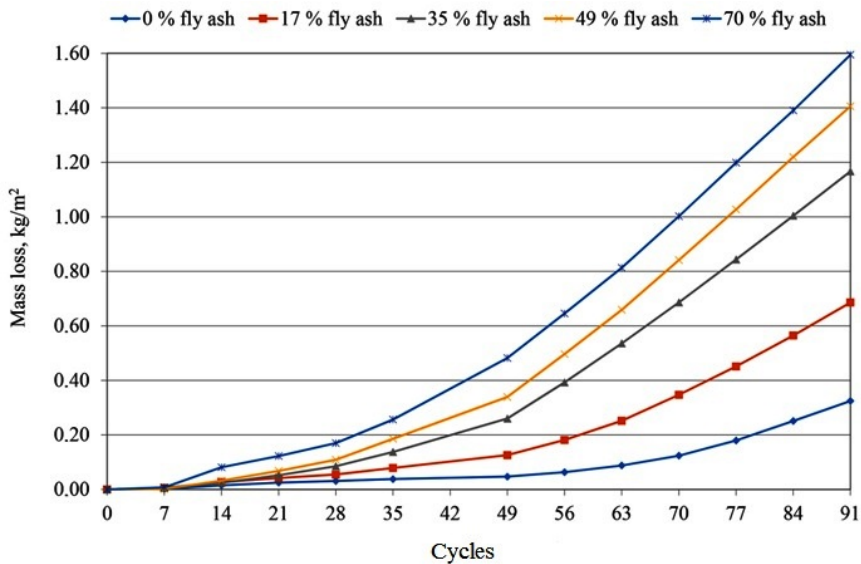


Fig. S.3.8. Hydrotechnical concrete containing different contents of fly ash contents resistance to the Baltic sea environment testing results

Fig. S.3.9 shows the mass loss of concrete with cement containing different amounts of silica fume (SiO_2) and 17% of fly ash additives. The results of tests suggest that the dosage of silica fume to a certain limit of 2% improves the resistance of hydro-technical concrete to BSE due to the reduction of the mass loss. The replacement of cement by 4% of silica fume results in similar mass loss as for samples without silica fume. The mass loss from concrete surface increases by the further increase of silica fume dosage which leads to the reduction of the concrete resistance to the action of the Baltic sea environment. Concrete samples containing 0% and 17% of blast furnace slag were tested according to the test procedure of concrete resistance to Baltic sea environment using different freezing media: distilled water, saline solution corresponding to the chemical composition of the Baltic sea water and 3% NaCl solution. The results of the research showed that the saline solution corresponding to the chemical composition of the Baltic sea water increases the mass loss compared to distilled water from insignificant (0.21 kg/m^2) to 1.8 and 3.07 kg/m^2 with 17% of slag additive and cement without mineral additives, respectively. The major destructive processes are caused in concrete immersed in 3% NaCl solution. In this case, the sample mass loss was up to 11 kg/m^2 . The results of these tests indicate that the freezing medium has a significant impact on the resistance of concrete to the environmental impact. A salt solution with chemical composition of the sea water must be used to obtain reliable results. The above mentioned

test methodology can also be used for concrete exploited in a liquid medium containing a different chemical composition, by replacing the freezing medium accordingly.

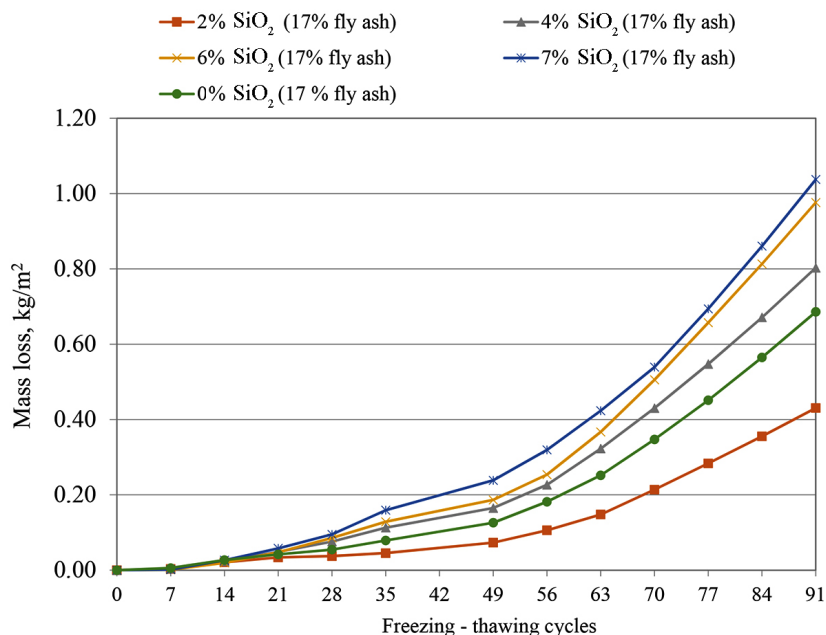


Fig. S.3.9. Hydrotechnical concrete containing 17% of fly ash and different contents of silica fume (SiO₂) resistance to the Baltic sea environment testing results

Tests on the resistance of concrete with a different aggregate to the BSE according to the test described above were carried out. Several fractions (2/8 and 11/16) of crushed granite were used as a high frost – resistant coarse aggregate. In the test, crushed granite coarse aggregate was replaced with crushed gravel of 0%, 25%, 50% and 75% by weight. The results show that the compressive strength of the concrete decreases evenly both after 7 (from 39 to 21 MPa) and 28 days (from 39 to 21 MPa). The decline in concrete compressive strength after 7 days by replacing 75% crushed granite with crushed gravel is 47% and after 28 days – 46%. The results show that as the amount of crushed gravel increases from 0% to 75% instead of crushed granite, the concrete sorption significantly increased after 370 hours from 0.62 to 1.39%.

The test results of the resistance of hydrotechnical concrete to BSE in accordance with the test procedure with varying amounts of crushed gravel are shown in Fig. S.3.10. The test results of the hydrotechnical concrete with a different quantities of crushed gravel – 0%, 25%, 50% and 75%, show that the mass loss from the test surface is steadily increase with the increase in the amount of crushed gravel in concrete. Unlike in concrete with different amounts of mineral additive in cement, in the concrete with different coarse aggregates, the difference between mass loss is already evident after 28 test

cycles and remains unchanged for the remaining test. It can be concluded that the crushed gravel, due to its poorer sorption characteristics, has a negative effect on the durability of hydrotechnical concrete in marine Environment. The results of chloride permeability investigation show that the use of fly ash and blast furnace slag as additives in concrete has a positive influence on the reduction of chloride diffusion coefficient and prevention of corrosion of reinforcement in concrete used for hydraulic structures. Fly ash and blast furnace slag acts as a pucolanic additive, which closes open capillary pores in concrete, and therefore it essentially reduces the chloride penetration in concrete. A fly ash substitute up to 35% reduces the chloride diffusion coefficient by about 47%, while a higher amount of mineral additive insignificantly lowers the chloride diffusion coefficient. The additional silica fume dosage up to 4% with 17% of fly ash additive in concrete reduces the chloride diffusion coefficient from 5.3 to 2.8 m^2/s , i. e. 47%. Greater dosage of silica fume even slightly increase the chloridediffusion coefficient in concrete. Therefore, the addition of silica fume with other mineral additives up to 4% positively affects on the hydrotechnical concrete in terms of protection against the reinforcement corrosion.

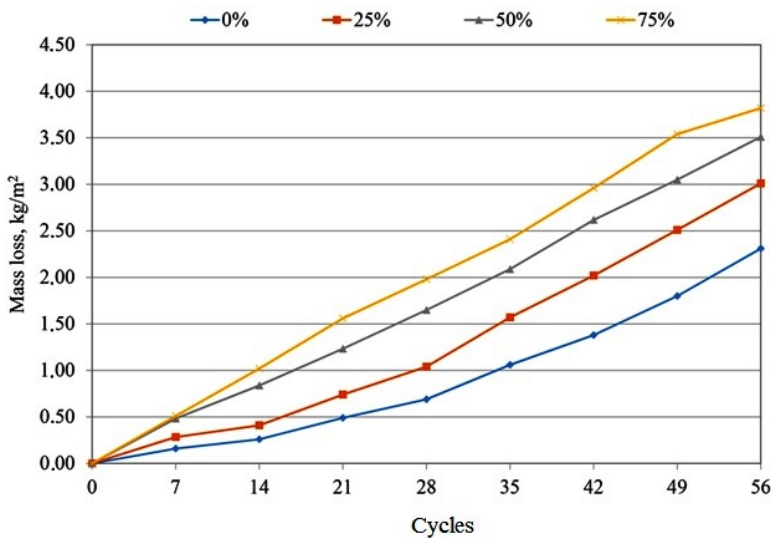


Fig. S.3.10. Hydrotechnical concrete with different contents of crushed gravel contents resistance to the Baltic sea environment testing results

The results of concrete sorption tests allow to predict the value of the chloride diffusion coefficient and the resistance of reinforced concrete to the impact of the marine Environment. The penetration of chlorides in the hydraulic concrete accelerates the corrosion of the reinforcement, however simultaneously with the freezing and thawing the most harmful effect of chlorides on the hydraulic concrete is obtained.

General conclusions

1. The compressive strength of concrete in the Baltic sea environment increases during exploitation and does not indicate degradation in volume. Concrete surface defects in the reinforced concrete structures of Klaipeda seaport are predominant due to impacts caused by the environmental impact and mechanical loads of the ships and defects caused by corrosion of the reinforcement.
2. The durability of concrete used in the Baltic sea environment must be evaluated according to the special test method such as determination of mass loss from the concrete surface after freezing and thawing cycles after saturation of concrete in a solution with chemical composition of the Baltic sea water by capillary absorption. According to durability investigation results the concrete resistance to Baltic sea environment impact testing method was obtained.
3. Concrete resistance to the Baltic sea environment can be predicted from the parameters of the concrete sorption – desorption. The size of sorption of the concrete should not exceed 0.8% after 2 weeks in such an environment.
4. Portland Cement replaced with blast furnace slag up to 35% of cement weight reduces concrete sorption, and mass loss after cyclic freezing and thawing in the seawater chemical composition solution and increases the durability of concrete under the Baltic sea environment conditions due to the reduction of capillary porosity (sorption) of hardened cement paste. Higher blast furnace slag dosage reduces the concrete durability under the Baltic sea environment conditions.
5. Portland Cement replacement with fly ash from 17% to 70% increases the sorption of concrete, the loss of mass after cyclic freezing and thawing in the seawater chemical composition solution and reduces the durability of concrete in the Baltic sea environment conditions due to the increase of capillary porosity (sorption) of hardened cement paste.
6. Portland Cement replacement with fly ash and blast furnace slag up to 35% reduces the chloride diffusion coefficient by 47% in concrete and reduces the corrosion possibilities of reinforcement in reinforced concrete structures exploited in the Baltic sea environment conditions due to the reduction of the capillary porosity (sorption) of the hardened cement paste due to reaction of the SiO_2 contained in the mineral additive and Ca(OH)_2 arising during the cement hydration.
7. Portland Cement replacement of silica fume up to 2% of cement weight increases concrete strength and reduces mass loss after freezing and thawing cycles by 38% due to the reduction of hardened cement paste capillary porosity (sorption) by 27%. Portland Cement replacement up to 6% maintains the same concrete strength and increases mass loss by 42% and reduces the resistance of concrete to be Baltic sea environment effects.
8. Partial replacement of the coarse crushed granite with crushed gravel aggregate reduces the resistance of the concrete to the Baltic sea environment and increases the loss of mass after freezing and thawing cycles: 25% crushed gravel replacement by about 30%, 50% crushed gravel replacement by about 52% and

75% crushed gravel replacement by about 65% due to the significant increase (up to 172%) of capillary porosity in the hardened cement paste.

9. For the concrete with reduced capillary porosity and optimal sorption parameters for application in Baltic sea environment production the composite Portland Cement with 30–35% of blast furnace slag additive and 2% of silica fume additive is recommended. To avoid the surface destruction processes the crushed granite coarse aggregate with high freezing – thawing resistance for concrete production must be used.

Priedai³

- A priedas.** Betono atsparumo Baltijos jūros aplinkos poveikiui bandymo metodika
- B priedas.** Disertacijos autorės sąžiningumo deklaracija
- C priedas.** Bendraautorių sutikimai teikti publikacijoje skelbtą medžiagą mokslo daktaro disertacijoje
- D priedas.** Autorės mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos

³ Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje

Ramunė LEBEDEVA

JŪROS APLINKOS POVEIKIS
HIDROTECHNINIO BETONO ILGAAMŽIŠKUMUI

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
medžiagų inžinerija (08T)

SEA ENVIRONMENT INFLUENCE ON
HYDROTECHNICAL CONCRETE
DURABILITY

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Materials Engineering (08T)

2018 07 13. 14,0 sp. l. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
<http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino BĮ UAB „Baltijos kopija“
Kareivių g. 13B, 09109 Vilnius